

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Porovnání vlivu frekvence snímání tlakových senzorů na záznam
tlakové odezvy

Comparison of Influence of Scanning Rate of Pressure Sensors on Record
of Pressure Response

Student:

Vojtěch Duda

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Adam Bureček, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zadání bakalářské práce

Student:

Vojtěch Duda

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma:

Porovnání vlivu frekvence snímání tlakových senzorů na záznam tlakové odezvy

Comparison of Influence of Scanning Rate of Pressure Sensors on
Record of Pressure Response

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše k problematice měření tlaku.
2. Popis použitých měřicích zařízení a senzorů.
3. Návrh a realizace experimentálního zařízení pro měření tlakové odezvy.
4. Experimentální měření tlakové odezvy pomocí dostupných tlakových senzorů.
5. Vyhodnocení vlivu frekvence snímání tlakových senzorů na měřenou tlakovou odezvu.

Seznam doporučené odborné literatury:

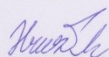
1. MIKAN, J. *Měření plynů*. Říčany u Prahy, 2003. 386 s. ISBN 80-7328-053-1.
2. JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1995. 152 s.
3. KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1996. 159 s.
4. PIVOŇKA, J. a kol. *Tekutinové mechanismy*. Praha: SNTL Praha, 1987. 623 s. 04-255-87.
5. ZEHNULA, K. *Snímače neelektrických veličin*. Praha: SNTL Praha 1983. 371 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

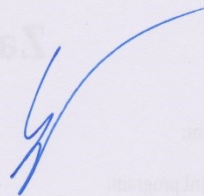
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Adam Bureček, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě: 16.5.2016

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, że Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu o oprávnění užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díly vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16.5.2016


.....
podpis

Jméno autora práce: Vojtěch Duda

Adresa trvalého pobytu autora práce: Kostelní 23, 747 21 Kravaře

Poděkování

„Tímto bych rád poděkoval Ing. Adamovi Burečkovi Ph.D. za vedení a odborné rady v mé bakalářské práci.“

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

DUDA, V. *Porovnání vlivu frekvence snímání tlakových senzorů na záznam tlakové odezvy: bakalářská práce*. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2016, 42 s. Vedoucí práce Bureček, A.

Bakalářská práce se zabývá porovnáním vlivu frekvence snímání tlakových senzorů na záznam tlakové odezvy. V práci se zabývám fyzikální veličinou, kterou je tlak a jeho měření. Dále jsou zde popsány porovnávané senzory tlaku a měřicí zařízení, která sloužila k zobrazení a záznamu měřených tlaků. V práci je dále popsán hydraulický obvod, na kterém probíhalo měření, včetně popisu všech použitých hydraulických prvků. Měření tlaků bylo provedeno při tlakových pulzacích a hydraulickém rázu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

DUDA, V. *Comparison of Influence of Scanning Rate of Pressure Sensors on Record of Pressure Response: Bachelor Thesis*. Ostrava, VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2016, 42 p. Thesis head: Bureček, A.

This bachelor thesis deals with comparing the effect of the frequency sensing pressure sensors to record pressure response. I deal with physical quantity, which is pressure and its measurement. There are also described the compared pressure sensors and measuring devices that serve to display and record measured pressures. The thesis describes a hydraulic circuit, which was measured, including a description of all the hydraulic components, too. Pressures measurement was performed of pressure pulsation and hydraulic impact.

Obsah

Úvod.....	10
1 Tlak a jeho měření.....	11
1.1 Tekutina.....	11
1.2 Obecné rozdělení tlakoměrů	12
1.3 Rozdělení tlakoměrů podle fyzikálního principu.....	13
1.3.1 Tlakoměry kapalinové	13
1.3.2 Tlakoměry se silovým účinkem.....	15
1.3.3 Tlakoměry deformační.....	15
1.3.4 Tlakoměry elektrické	18
2 Popis experimentálního zařízení.....	22
2.1 Tlakové senzory	22
2.1.1 Tlakový senzor Hydrotechnik PR 410 High speed – pěti pinový.....	22
2.1.2 Tlakový senzor Hydrotechnik PR 15 Heavy duty – pěti pinový	22
2.1.3 Tlakový senzor Hydac HDA 4446-A-250-000.....	22
2.2 Měřicí zařízení	23
2.2.1 Hydrotechnik Multi-System 5060 Plus.....	23
2.2.2 Hydrotechnik Multi-System 5050	24
2.2.3 Hydac HMG 3000.....	24
2.3 Schéma a prvky hydraulického obvodu	25
2.4 Popis vybraných prvků obvodu.....	27
3 Popis měření	29
3.1 Měření tlakových pulzací.....	29
3.2 Měření hydraulického rázu	30
3.3 Porovnání výsledků měření tlakových pulzací při rozdílné teplotě oleje t_o	31
4 Vyhodnocení měření	33
4.1 Měření tlakových pulzací při teplotě oleje $t_o = 25\text{ °C}$	33
4.1.1 Měření pro frekvenci tlakových pulzací $f = 5\text{ Hz}$	33
4.1.2 Měření pro frekvenci tlakových pulzací $f = 8\text{ Hz}$	35
4.2 Měření tlakových pulzací při teplotě oleje $t_o = 45\text{ °C}$	36
4.2.1 Měření pro frekvenci pulzací $f = 5\text{ Hz}$	36
4.2.2 Měření pro frekvenci pulzací $f = 8\text{ Hz}$	37
4.3 Měření hydraulického rázu	38
5 Závěr.....	40
6 Seznam použité literatury	41

Seznam použitých značek a veličin

Značka:	Název:	Rozměr:
C	elektrická kapacita	F
f	frekvence	Hz
F	síla	N
g	tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
I	elektrický proud	A
m	hmotnost	kg
p	měrný tlak	Pa
r	měrná plynová konstanta	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
S	plocha	m^2
t	čas	s
T	perioda	s
T_P	teplota plynů	K, °C
t_o	teplota oleje	°C
U	elektrické napětí	V
v	měrný objem	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
V	objem	m^3
ρ	hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Δp	tlakový spád	Pa
H, L	délkové rozměry hladiny tlakoměrné kapaliny	m
ε	permitivita	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$

Úvod

Měření tlaku je v dnešní době zahrnuto téměř u všech hydraulických a pneumatických mechanismů, zjišťují se hodnoty tlaku, velikosti tlakového spádu na jednotlivých prvcích, nebo se i tímto způsobem diagnostikují závady. Existuje velké množství typů tlakoměrů, v poslední době se rozvíjí do velké šíře tlakoměry elektrické, které jsou schopny převést tlak na hodnotu elektrického signálu, která je dobře převoditelná do digitální podoby.

Rychle měřící tlakové senzory jsou zvláště vhodné pro měření tlakových špiček. Nejrychlejší použitý senzor v této bakalářské práci (Hydrotechnik PR 410) je schopen měřit až deset tisíc hodnot za sekundu. Jinými tlakoměry nejsme schopni dosáhnout takového počtu hodnot a přesnosti.

Bude provedena literární rešerše problematiky tlaku a jeho měření. Získané informace budou použity pro zpracování kapitoly 1.

Dále se budu věnovat popisu hydraulického obvodu a všech jeho prvků. Následovat bude specifikace porovnávaných tlakových senzorů a jejich měřících zařízení, což bude obsahem kapitoly 2.

Třetí kapitola bude věnována popisu experimentálního měření, které bude provedeno pro tlakové pulzace o dvou frekvencích f , při dvou různých teplotách hydraulického oleje t_o . Současně bude provedeno měření hydraulického rázu. Součástí této kapitoly bude porovnání měření tlakových pulzací jedním snímačem, při dvou různých teplotách oleje t_o .

Porovnání naměřených výsledků bude detailně zpracováno v kapitole 4. Budou tam uvedeny výsledky měření tlakových pulzací pro dvě teploty oleje t_o . Dále zde bude detailně zobrazena tlaková špička, která nastala při hydraulickém rázu.

Na závěr v kapitole 5, je celkově zhodnocena celá práce a výsledky porovnání senzorů.

1 Tlak a jeho měření

1.1 Tekutina

Při řešení hydraulických a pneumatických úloh si tekutinu představujeme jako spojitě stejnorodé prostředí. Pod pojmem stejnorodost (izotropie) se rozumí shodné vlastnosti všech částic kapaliny nezávislé na jejich poloze a směru působení sil. Tento předpoklad umožňuje řešit úlohy mechaniky tekutin na zvoleném, velmi malém objemu kapaliny, a odvozené zákonitosti rozšířit na její celý objem.

Při pohybu kapaliny vnímáme jen její střední pohyby. Ve skutečnosti její pohyb je složitější a porušuje tím izotropii tekutiny, která se však neustálými změnami molekulární struktury znovu obnovuje.

V hydromechanice je zaveden pojem ideální neboli dokonalé tekutiny, která nemá vnitřní tření (bez vazkosti) a je nestlačitelná. Tento pojem, ač nevystihuje skutečnost, si vytvořil člověk, neboť dovoluje odvodit jednodušeji některé zákonitosti. Dokonalá tekutina může být namáhána jen tlakem, zatím co skutečná (vazká) tekutina může být vedle toho namáhána jistou smykovou silou (za pohybu).

Tekutina je látka, která se na rozdíl od tuhých těles vždy nevratně deformuje. Nemá vlastní tvar a za působení nepatrných tečných sil se částice tekutiny snadno uvedou do pohybu (výjimkou jsou některé ne-newtonovské kapaliny).

Tekutiny se dělí:

A. Nestlačitelné, které působením tlaku a normálních sil, jen nepatrně mění svůj objem – zde se řadí kapaliny. Malé objemy kapalin tvoří kapky. Kapaliny zaujímají tvar nádoby, vyplňují její spodní část a vytvářejí volnou hladinu.

B. Stlačitelné, tedy i rozpínavé, které vyplňují vždy celý objem nádoby. Podle toho, zda jejich stav je blízko či daleko bodu zkapalnění, jsou to buď páry, nebo plyny. Společně jsou nazývány jako vzdušiny. Stav tekutiny, která se nachází v rovnováze, může být určen měrným tlakem, hustotou a teplotou.

- **Hustota ρ** (měrná hmotnost) je rovna poměru hmotnosti elementární částice tekutiny dm , k jejímu elementárnímu objemu dV .

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.1)$$

Převrácená hodnota hustoty je měrný objem v

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{dV}{dm} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]. \quad (1.2)$$

Hustota kapalin se mění s tlakem a teplotou nepatrně a budeme ji považovat za konstantní. Hustota plynů je funkcí stavových veličin tzn. tlaku p (Pa) a teploty T_P (K). Pro její výpočet se bude používat jednoduchá stavová rovnice ideálního plynu:

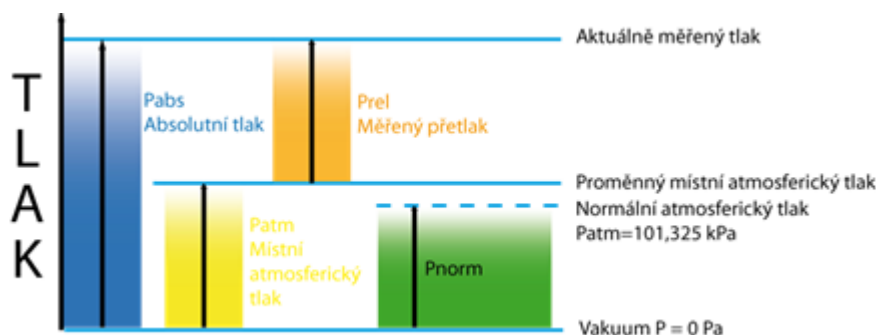
$$p \cdot v = \frac{p}{\rho} = r \cdot T_P \quad (1.3)$$

Kde: r [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je měrná plynová konstanta, jejíž velikost závisí na druhu plynu

- **Měrný tlak p** (v praxi zpravidla označován jen tlak) je roven poměru elementární tlakové síly dF , působící kolmo na elementární plošku dS .

$$p = \frac{dF}{dS} \text{ [Pa]} \quad (1.4)$$

Absolutní tlak se odečítá od nulové hodnoty tlaku, přetlak a podtlak se odečítají od barometrického tlaku, viz obr. 1.1.



Obr. 1.1 Vzájemné vztahy mezi tlakem [4]

- **Teplota T_P** [°C, K]. V tomto případě se proudění považuje vždy za izotermní, $T_P = \text{konstanta}$. Údaj teploty bude sloužit jen pro přesné určení parametrů tekutiny jako je hustota a viskozita [1].

1.2 Obecné rozdělení tlakoměrů

Pro měření tlaku lze využít mnoha fyzikálních principů, které se odlišují různým charakterem převodu tlaku na výstupní signál. Měřiče tlaku lze rozdělit podle několika hledisek [2, 3]:

Podle rozsahu měření:

- Manometry pro měření přetlaků
- Barometry pro měření tlaku ovzduší
- Vakuometry pro měření velkých podtlaků
- Diferenční (rozdílové) tlakoměry pro měření tlakových rozdílů
- Manovakuometry pro měření přetlaků a podtlaků

Podle fyzikálního principu

- Kapalinové – jsou založeny na účinku hydrostatického tlaku, který vyvoluje tlakoměrná kapalina
- Se silovým účinkem – měření tlaku se převádí na měření síly, jejíž účinky jsou vyvozovány např. závažím, nebo pružným členem.
- Deformační – měřený tlak způsobuje měrnou deformaci tlakoměrného členu. Velikost deformace je přímo úměrná měřenému tlaku.
- Elektrické – využívají principu tlakové závislosti na elektrických veličinách

Podle stupně přesnosti

- Provozní – bývají nejméně přesné, přesná velikost tlaku není potřebná
- Kontrolní – jsou o třídu přesnější než provozní tlakoměry
- Laboratorní – jsou nejpřesnější

1.3 Rozdělení tlakoměrů podle fyzikálního principu

1.3.1 Tlakoměry kapalinové

Měřený tlak je vyrovnáván hydrostatickým tlakem sloupce tlakoměrné kapaliny. Velikost tlaku je dána výškou sloupce a měrnou hmotností kapaliny. Tlakoměrná kapalina tvoří náplň tlakoměrných přístrojů. Pro různé rozsahy se používá kapalina o různé hustotě (obr. 1.2).

	Hustota při 0°C [kg·m ⁻³]	Výhody	Nevýhody
Alkohol	806,3	nízké povrchové napětí	hořlavý, pohlcuje vlhkost ovzduší
Voda	999,8	dostupnost, závislá jen teplotě	velké povrchové napětí (u trubic malých průměrů a měření malých tlakových rozdílů)
Tetrachlor	1632,5	dobře obarvitelný	změna hustoty znečištěním, působí korozivně
Rtuť	13595	velká stálost vlastností	velké povrchové napětí (nesmáčí stěny), jedovatá, působí korozivně

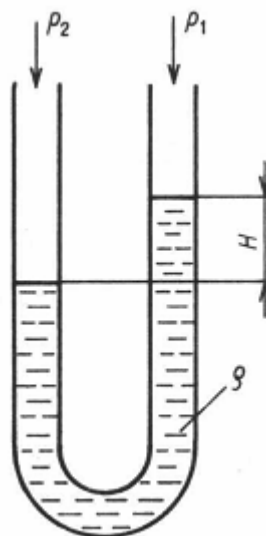
Obr. 1.2 Přehled kapalin užívaných v kapalinových tlakoměrech

U – trubicový tlakoměr

Je to jeden s velice často používaných tlakoměrů. Základem skleněná trubice ohnutá do tvaru písmene U, obsahující tlakoměrnou kapalinu. Pro obr. 1.3, platí tato rovnice:

$$p_2 = \rho \cdot g \cdot H + p_1 \quad (1.5)$$

$$\Rightarrow \Delta p = p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot H$$



Obr. 1.3 U – trubicový tlakoměr [5]

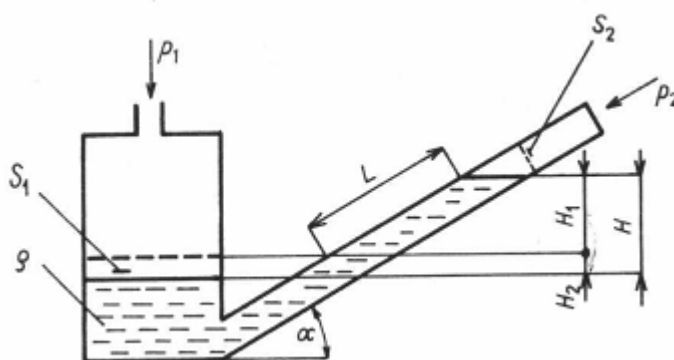
Sklonný tlakoměr

Funguje na obdobném principu jako U – trubicový tlakoměr, výchylka se odečítá pouze v trubici, která musí mít stejnou světlost (musí být cejkovaná). Jedná se o jednoramenný U-trubicový tlakoměr. Těmito typy tlakoměrů lze dosáhnout velice přesnému výsledku kontrolních měření, nebo malých tlakových rozdílů. Pro obr. 1.4 platí rovnice [2, 3]:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot H = \rho \cdot g \cdot (H_1 + H_2) = \rho \cdot g \cdot (H_2 + L \cdot \sin \alpha) \quad (1.6)$$

$$S_1 \cdot H_2 = S_2 \cdot L \quad (1.7)$$

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot L \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} + \sin \alpha \right) \quad (1.8)$$



Obr. 1.4 Sklonný manometr [5]

Betzův tlakoměr

Využívá se pro přesná, především laboratorní měření. Vyznačuje se přesným odečítáním hladiny tlakoměrné kapaliny v trubici tlakoměru. Na hladině kapaliny plave skleněný plováček, na kterém je zavěšeno skleněné průhledné měřítko. Optickým systémem se promítá obraz na matnici, kde se odečítá hodnota výchylky kapaliny v trubici, s přesností 0,05mm. Tento typ tlakoměru není vhodný pro měření tlaků, které se v závislosti na čase rychle mění. Pro svou přesnost se využívá ke kalibraci jiných tlakoměrů.

Prstencový tlakoměr

Základní část je dutá kruhová trubice, která je otočně uložena ve svém středu. Trubice je téměř do poloviny naplněna kapalinou, která spolu s přepážkou rozděluje vnitřní prostor na dvě části. Oba prostory jsou připojeny pomocí ohebných přívodů k tlakovému prostředí. Na spodní části prstence je připevněno závaží, které určuje svou tíhou základní polohu. Pokud je mezi oběma přívody p tlakový rozdíl, způsobí v těžišti plochy přepážky tlakové síly, které vytvoří krouticí moment a tím natočení prstence o úhel α . S prstencem je spojeno ukazovací zařízení nebo čidlo úhlové výchylky (potenciometr, indukčnostní snímač apod.).

Prstencové tlakoměry mají proti ostatním tlakoměrům podstatně větší citlivost. Měří přetlak, podtlak a tlakový rozdíl. Výhodou je jednoduchá změna rozsahu výměnou závaží i za provozu a necitlivost na změnu teploty. Nevýhodou je velká setrvačnost.

Nevýhoda veškerých nádobkových tlakoměrů je, že průřezy nádobek i trubic musí být konstantní, aby nedošlo ke změně hodnoty převodu. Z tohoto důvodu musí být trubice tlakoměrů cejchovány.

Mnohé z kapalinových tlakoměrů jsou jednoduché, spolehlivé a přesné přístroje. Další nevýhoda spočívá v tom, že v současné době neumíme dobře převést změřenou hodnotu na elektrický signál, který by se dal použít pro přenos dat a další zpracování např. v PC [3,4].

1.3.2 Tlakoměry se silovým účinkem

Měrný tlak působí na píst, který je vyvážen závažím, nebo pružným členem. Z velikosti vyvážení a rozměrů pístu se určí měřený tlak.

Pístový tlakoměr

Je to tlakoměr, používaný hlavně k cejchování převážně deformačních tlakoměrů především v laboratorních provozech. Podstatou je píst přesného průřezu ve válci. Tlak na píst opatřený talířem se ve většině případů přenáší olejem, kterým je celý systém tlakoměru vyplněn. Síla působící měřeným tlakem na píst je vyrovnána gravitační silou pístu a závaží. Při zastavení pístu nastane rovnováha mezi tlakem oleje a silou závaží. U provozního pístového tlakoměru je kompenzační síla vyvozena pružinou. Výhodou tohoto přístroje je, že lze libovolně změnit část rozsahu použitím přidavného závaží. Pro převod na elektrický signál je možno použít jakéhokoli snímače tlakové síly, nebo jiných prvků.

Zvonový tlakoměr

Skládá se ze zvonu ponořeného do kapaliny, pod který je přiveden měřený tlak. Mírou tlaku je zdvih zvonu. V základní poloze ponořený zvon na hladině plave. Při zavedení tlaku se začne nadzvedávat vnitřní řídicí silou F_i .

$$F_i = p \cdot S_1 \quad (1.9)$$

Proti této síle působí síla způsobena vynořováním zvonu F_o .

$$F_o = \rho \cdot H \cdot g \cdot (S_2 - S_1) \quad (1.10)$$

Kde: ρ = hustota kapaliny v nádobě, S_1 = vnitřní plocha dna zvonu, S_2 = vnější plocha dna zvonu, H = zdvih pístu, g = tíhové zrychlení, p = měřený tlak.

Při rovnosti těchto dvou sil se zvon zastaví a jeho zdvih je úměrný měřenému tlaku podle vztahu:

$$p = \frac{S_2}{S_1} \cdot \rho \cdot g \cdot H = e \cdot \rho \cdot g \cdot H = k \cdot H \quad (1.11)$$

Kde: $e = \frac{S_2}{S_1}$ = převod tlakoměru, $k = e \cdot \rho \cdot g$ = konstanta tlakoměru.

Zvonový tlakoměr se používá k obdobným účelům jako pístový. Rozsah je okolo 1 kPa, rozsah pístového bývá až dvojnásobný. Oba mají vysokou přesnost. Kapaliny, které se do těchto tlakoměrů používají: voda, olej, petrolej nebo toluen [2, 4, 5].

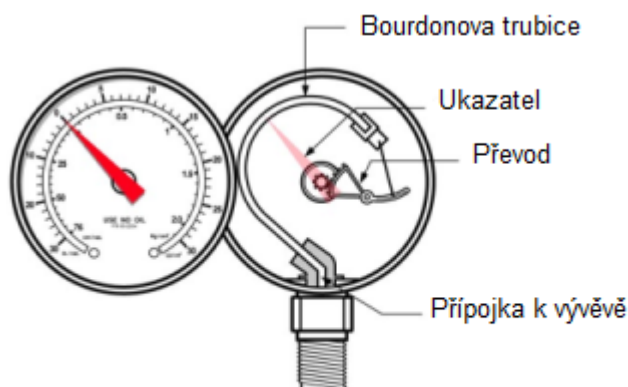
1.3.3 Tlakoměry deformační

Funkční princip je založen na pružné deformaci. Deformační členy se zhotovují z uhlíkových a niklovaných ocelí, mosazi, bronzu a dalších vhodných slitin. Výchylka se

zpracovává buď převodem na přímý ukazatel, nebo převodem na elektrický, popř. pneumatický signál, který se dále vyhodnocuje [2, 6, 7].

Trubicový tlakoměr

Také nazýván jako Bourdonův tlakoměr (obr. 1.5), je nejpoužívanější typem deformačního tlakoměru. Deformačním prvkem je Bourdonova trubice oválného průřezu, stočená do oválného profilu, šroubovice, nebo spirály. Jedním koncem je trubice pevně spojena s tělem tlakoměru, které je opatřeno šroubením pro připojení měřeného tlaku. Druhý konec trubice je uzavřen a pomocí převodů spojen s ukazatelem hodnoty na stupnici. Při působení tlaku se snaží eliptický průřez změnit v kruhový a zakřivení oblouku, do kterého je trubice stočena, se přitom zvětšuje. Pro nízké tlaky je trubice mosazná, bronzová a má plošší profil, pro vyšší tlaky je ocelová a blíží se kruhovému profilu. Tyto tlakoměry jsou schopny měřit i podtlak.



Obr. 1.5 Bourdonův manometr [9]

Membránový tlakoměr

Jako tlakoměrnou část využívají ocelové membrány kruhového tvaru, která je zvlněná soustřednými kruhy. Membrána je sevřená mezi přírubami. Z jedné strany je přiváděn měřený tlak, který vyvolá průhyb membrány, z druhé je vývod stupnicový ukazatel (obr. 1.6). Tyto tlakoměry jsou citlivější než trubicové, ale nejsou schopné měřit tlaky vyšší než 4 MPa. Pro nízké tlaky se využívá pryžových membrán s textilní vložkou, kde deformačním prvkem je pružina z ocelového drátu. Pro vysoké tlaky se používají tuhé membrány (kruhové desky). Přívodem tlaků na membránu z obou stran je možné měřit tlakovou diferencí. Výhodou je, že můžou měřit rychle pulsující tlaky a nevadí jim funkce v provozech s otřesy a chvěním. Deformace jsou snímány především elektricky.

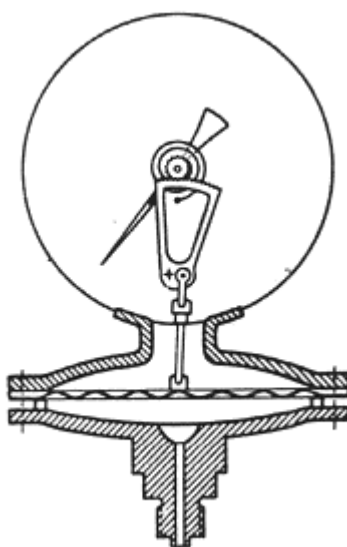
Krabicový tlakoměr

Jedná se v podstatě o jiný druh membránového tlakoměru, u něhož se zvětšení síly a zdvihu dosahuje zvětšením plochy membrány, protože jedna membrána dává při měření celkově malý zdvih. Tlakoměrným prvkem je plochá krabice tvořená dvěma zvlněnými membránami. Pro zvýšení citlivosti se zapojí několik krabic do jednoho celku. Deformace krabice se převádí na ukazatel mechanickým (pákovým) převodem. K převodu výchylky krabice na elektrický signál musí být použito snímače s minimálním silovým zatížením, protože přestavující síla je malá. Krabicové tlakoměry mají využití pro měření malých

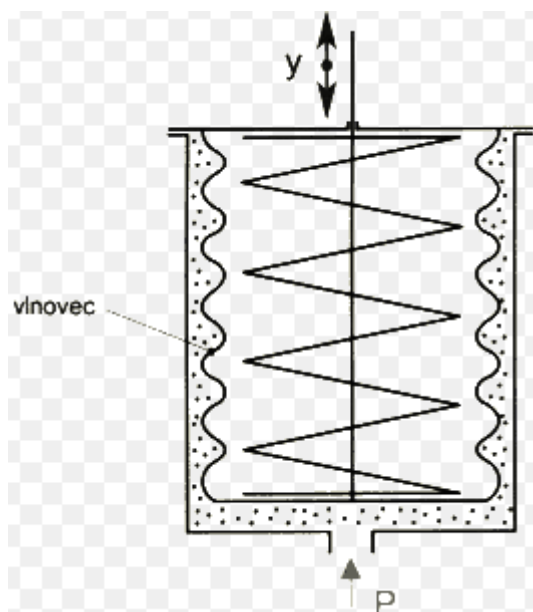
přetlaků, podtlaků či tlakových diferencí. Tlakoměrná krabice se používá i v přístroji sloužícím pro měření barometrického tlaku, tzv. aneroidu. V tomto případě je prostor krabice neprodyšně uzavřen, vakuován a barometrický tlak působí na krabici z vnějšku.

Vlnovcový tlakoměr

Tlakoměrným prvkem je slabostěnný kovový měch – vlnovec. Je umístěn v pouzdře, do něhož je přiváděn měřený tlak (obr. 1.7). Deformace vlnovce je přenášena táhlem na ukazatel. Odolnosti proti deformaci, tzv. tuhost vlnovce lze snadno zvětšit vložením pružiny. Tímto dojde ke změně charakteristiky a měřicího rozsahu tlakoměru. V případě, že měření tlakové difference se vyšší tlak přivádí do pouzdra a nižší do vlnovce. Používá se jak měchu kovového, tak z plastické hmoty (např. teflon). Hlavní použití kovových vlnovců s pružinou je v regulační technice.



Obr. 1.6 Membránový manometr [10]



Obr. 1.7 Vlnovcový manometr [10]

Veškeré typy deformačních manometrů se používají při konstrukci monostatů (zařízení udržující stejný tlak), které při dosažení požadovaného nebo nastaveného tlaku spínají nebo rozpínají ovládací kontakty regulačního obvodu (obvykle dvupolohová regulace). Jedná se např. o ovládání kompresoroven, domácích vodáren apod. Kontakty jsou buď mechanické, nebo rtuťové [2, 5].

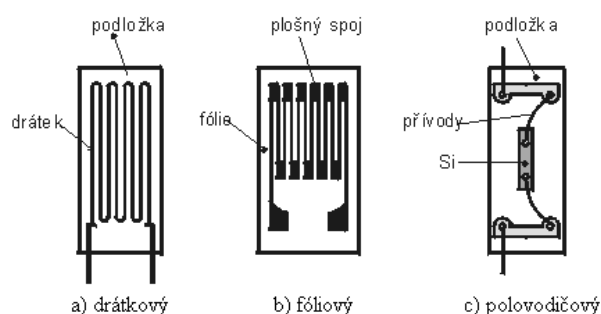
1.3.4 Tlakoměry elektrické

Umožňují měření absolutního a diferenčního tlaku. Tlak média působící na membránu snímače je převeden pomocí piezoelektrických, magnetických nebo indukčních senzorů na elektrický impuls, který odpovídá naměřené hodnotě tlaku. Ta se pak zobrazí na vhodném elektronickém zařízení [2, 7, 8].

Snímače s odporovými tenzometry = piezorezistivní

K dálkovému přenosu informace, nebo pro automatická řízení jsou požadovány tlakoměry s elektrickým výstupním signálem. Tuto funkci mohou splnit deformační manometry, vybavené odporovými tenzometry, které slouží jako převodníky mechanického signálu na elektrický.

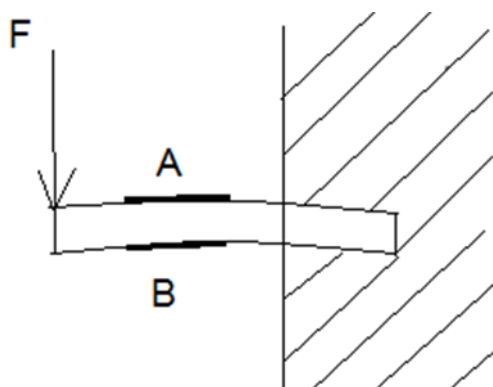
Odporový tenzometr je odporový senzor, u něhož se využívá tzv. piezorezistivního jevu. Tento jev byl objeven roku 1954 Charlesem S. Smithem. Při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací dochází u kovových vodičů a polovodičů k diferenci geometrických rozměrů a k diferenci krystalografické orientace, jež vedou ke změně odporu. Podstata funkce spočívá ve výrazné a přesné změně jeho odporu v závislosti na mechanické deformaci. Běžné materiály se obvyklými zatíženími deformují tak málo, že to lidskými smysly nezjistíme. Teprve odporové tenzometry umožnily tyto deformace přesně elektricky měřit. Síly, které působí v mezích platnosti Hookeova zákona a jsou vyvolány tlakem nebo tahem. Provedení odporových tenzometrických snímačů viz obr. 1.8 [7, 11, 12].



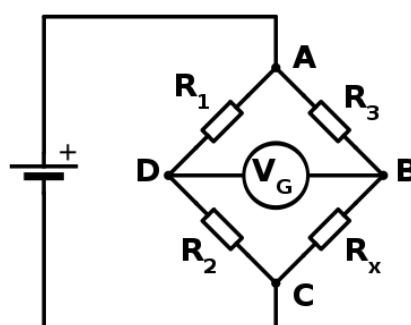
Obr. 1.8 Provedení odporových tenzometrů [12]

Základní úkol odporového tenzometru je, aby reagoval změnou odporu na mechanickou deformaci vyvolanou působící silou. Často užívaným zařízením je siloměrný člen, tvořený vetknutým nosníkem, na kterém jsou nalepeny tenzometrické snímače. Silou působící na volném konci je nosník namáhán pružnými deformacemi (obr. 1.9). Vlivem těchto deformací jsou povrchová vlákna nosníku zatěžována na straně působící síly F tahem a na straně odvrácené tlakem. Tenzometr „A“ je natahován a tenzometr „B“ je smršťován. Zapojením takovýchto tenzometrů do různých větví můstku dochází ke zvýšení citlivosti měření a současně k vykompenzování teplotní závislosti odporu. Měřicí odpory bývají uspořádány do tzv. Wheatstoneova můstkového zapojení (obr. 1.10). Přes tento můstek

prochází proud a při změně odporu dojde i ke změně procházejícího proudu. Můstek tyto změny detekuje a udává informace o změně tlaku v podobě změn napětí.



Obr. 1.9 Vetknutý nosník s tenzometry A, B



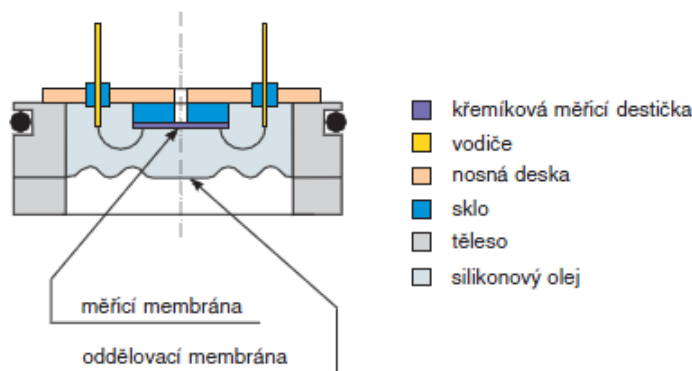
Obr. 1.10 Elektrické schéma Wheatsoneova můstkového zapojení [12]

Odporové tenzometry mohou být dvojího typu a to kovové nebo polovodičové [7, 8].

Kovové se vyrábějí z odporových drátků průměru 0,02 až 0,05mm, které jsou lepeny na tenký podklad z papíru, nebo plastické hmoty. Mají tvar mnohonásobné vlásenky. Celý tenzometrický snímač se na měřenou součást přilepí speciálním lepidlem. Tenzometrické snímače složitých tvarů (radiální, spirálové aj.) se dnes vyrábějí odleptáváním z tenké odporové fólie (postup shodný jako při výrobě plošných spojů). Takto zhotovené fóliové snímače mají lepší vlastnosti než snímače drátkové.

Polovodičové tenzometry se vyrábějí z křemíku a to buď řezáním, broušením, leptáním monokrystalu, nebo planární technologií na křemíkovém, nebo jiném substrátu. Působením mechanického namáhání v krystalografické ose monokrystalu, nebo difúzní vrstvě polovodiče, dochází ke změně elektrické vodivosti. Polovodičové tenzometry vykazují nelineární závislost odporu na deformaci i teplotě.

Tyto snímače se vyznačují malými rozměry a malou hysterezí. Jsou dlouhodobě stabilní a mají velmi dobrou reprodukovatelnost měření. Nevýhodou může být citlivost křemíkové vrstvy na agresivní látky a vlhkost. Pokud jsou tyto senzory používány v náročnějších podmínkách, chrání se samotný snímač zástavbou do pouzdra, které je opatřeno oddělovací membránou, jak je patrné z obr. 1.11. Nevýhodou těchto snímačů je nutnost jejich napájení.



Obr. 1.11 Řez piezorezistivním snímačem tlaku s oddělovací membránou [11]

Piezoelektrické snímače tlaku

Z řeckého slova *piedzó* = tlačit. Jsou založeny na tzv. Piezoelektrickém jevu. Při působení mechanických deformací dochází u určitých druhů krystalů ke vzniku elektrického náboje. Tento děj je reciprokový tzn. přiložením střídavého elektrického pole se krystal mechanicky rozkmitá. Tyto vlastnosti vykazuje např. křemen, titaničitan barnatý a olovnatý, některé makromolekulární látky a jiné. Piezoelektrický element tvoří výbrus získaný z krystalu křemene vyřezáním destičky, jejíž hrany budou rovnoběžné s jednotlivými osami krystalu (X - osa elektrická, Y - osa mechanická, Z - osa optická).

Piezoelektrický modul křemene má poměrně malou hodnotu. Jeho přednost je lineární statická charakteristika, minimální závislost piezoelektrické konstanty na teplotě, velký měřicí rozsah, který je dán mechanickou pevností krystalu a velké teplotní rozmezí (maximálně do 550 °C).

Piezoelektrický snímač je vytvořen z krystalografického výbrusu, který obsahuje vodivé elektrody. Při působení neelektrické veličiny se piezoelektrický snímač chová jako generátor náboje, protože dielektrikum má velký izolační odpor.

Tento druh snímačů se používá výhradně pro měření dynamických tlaků od frekvencí 3 až 5 Hz. Chyba generovaného signálu je okolo 1%. Pokud se snímají průběhy tlaku tekutin s vysokou teplotou, je nutné zabezpečit chlazení snímače. Výhodou jsou malé rozměry, jednoduchost a možnost měření v širokém rozsahu frekvencí. Používají především k měření tlaku, tlakové síly, zrychlení, výchylky a mechanického napětí [2, 7, 8].

Kapacitní snímače tlaku

Základem kapacitního snímače je dvou, nebo několika elektrodový systém, jehož parametry se mění působením měřené neelektrické veličiny. Pro kapacitu jednoduchého deskového kondenzátoru C , bude platit:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (1.12)$$

Kde: S = plocha elektrod, d = vzdálenost elektrod, ε_0 = permitivita vakua, ε_r = relativní permitivita

Z rovnice vyplývá, že změnu kapacity lze způsobit změnou plochy elektrod, vzdáleností elektrod nebo změnou dielektrika (relativní permitivity ε_r).

Pro měření tlaku se využívá kapacitního snímače, u něhož dochází ke změně vzdálenosti mezi elektrodami. Jedna elektroda kondenzátoru je pevná a druhá je tvořena membránou, která vlivem působení měřeného tlaku mění svou polohu. Pokud budeme uvažovat, že se v rovnici mění d , ostatní veličiny zahrneme do konstanty k , a potom dostaneme

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} = \frac{k}{d}. \quad (1.13)$$

Membránový senzor tlaku, pracující na principu diferenčního kapacitního senzoru, se využívá při vyhodnocování tlakového rozdílu u měření průtoku tekutin škrticími orgány. Elektrické vyhodnocovací obvody, které převádí změny kapacity na výstupní elektrický signál, bývají doplněny obvody pro potlačení vlivů parazitních kapacit. Ty jsou způsobeny kapacitami kabelu, stínícího krytu a přívodů.

Používají se pro měření dynamických tlaků, pro měření statických tlaků minimálně. Statické tlaky měří s chybou cca 1 %. Jejich měřicí membrána má zpravidla vysokou vlastní frekvenci. Výměnou za jinou s rozdílnou tuhostí lze měnit frekvenční rozsah měření a jeho citlivost. Kapacitní snímače se napájejí střídavým proudem. Změna kapacity se měří buď v můstkovém zapojení, nebo s využitím frekvenční modulace [2, 7, 8].

2 Popis experimentálního zařízení

2.1 Tlakové senzory

Předmětem porovnání jsou tři piezorezistivní senzory tlaku (obr. 2.1), dva jsou od firmy Hydrotechnik a jeden od firmy Hydac.

2.1.1 Tlakový senzor Hydrotechnik PR 410 High speed – pěti pinový

Tento snímač umožňuje vysokou frekvenci snímání tlaku a lze použít s měřicími sadami Multi System 5060 Plus a 8050 family. Snímač je schopen číst kolem deseti tisíc hodnot za jednu sekundu. Je vhodný pro měření tlakových rázů. Disponuje ochranou IP 65. Senzory existují v provedení pro různá tlaková rozmezí [13].

Tento snímač pracuje na piezorezistivním principu, který byl vysvětlen v kapitole jedna.

Materiál: Nerezová ocel

Napájecí napětí je od 9,5 do 30V

Výstupní signál $4 \div 20$ mA

Přesnost: $\leq \pm 0,2\%$

Přípojka: ISO 228 - G1/4" BSP

Existují tyto typy:

Od 0 do 6 MPa – oranžová barva

Od 0 do 20 MPa – žlutá barva

Od 0 do 40 MPa – modrá barva

Od 0 do 60 MPa – zelená barva

V měření je využito snímače s nejvyšším možným rozsahem, tj. od 0 do 60 MPa.

Vyhodnocovat signál z tohoto senzoru budeme pomocí mobilního měřicího přístroje Hydrotechnik MS 5060+.

2.1.2 Tlakový senzor Hydrotechnik PR 15 Heavy duty – pěti pinový

Jedná se o robustní a přesný tlakový snímač pro zkušební zařízení Hydrotechnik nebo pro průmyslové využití [13].

Materiál: Nerezová ocel

Napájecí napětí je od 6,5 do 30V

Výstupní signál $4 \div 20$ mA

Přesnost: $\leq \pm 0,15\%$ z konečné hodnoty

Přípojka: ISO 228 - G1/4" BSP Female

Měřicí rozsah: 0 až 40 MPa

Vyhodnocovat signál z tohoto senzoru budeme pomocí mobilního měřicího přístroje Hydrotechnik MS 5050.

2.1.3 Tlakový senzor Hydac HDA 4446-A-250-000

Jedná se o senzor řady HDA 4000 – v textu je popisován vždy tímto způsobem [14].

Měřicí rozsah: $0 \div 25$ MPa

Mechanické připojení: G 1/4 A DIN 3852 Male

Elektrické připojení: M12x1 zástrčka, čtyřpólová

Výstupní signál: $4 \div 20$ mA

Přesnost (včetně linearity, hystereze, opakovatelnosti): $\leq \pm 0,5\%$ z měř. rozsahu

Náběhový čas: cca 1 ms

Rozsah provozních teplot: od -25 °C do 85 °C

Rozsah teploty kapaliny: od -40 °C do 100 °C

Vyhodnocovat signál z tohoto senzoru budeme pomocí mobilního měřicího přístroje Hydac HMG 3000.



Obr. 2.1 Sensory tlaku (zleva: Hyrotechnik PR 410, Hydac HDA 4000, Hyrotechnik PR 15)

2.2 Měřicí zařízení

Ke každému snímači bylo použito jedno měřicí zařízení (obr. 2.2). Párování snímačů a měřicích zařízení bylo zvoleno tak, aby měly stejného výrobce a navzájem si odpovídaly požadavkům. Např. k nejmodernějšímu a nejrychlejšímu snímači bylo přiděleno nejnovější snímací zařízení, které bylo k dispozici [13, 14].

2.2.1 Hyrotechnik Multi-System 5060 Plus

Měřicí vstupy:

Jednotka má šest analogových vstupních kanálů a dva frekvenční.

Vstupní veličiny mohou být: 0/4 ÷ 20 mA; 0/1/2 ÷ 10 V; 0,5 ÷ 4,5 V; ± 10 V

Rychlost měření:

Standardní senzor: Nejrychleji co 1 ms

Vysoce-rychlostní senzor: Nejrychleji co 0,1 ms

Chyba měření:

Pro analogový vstup: ± 0,15 % z koncové hodnoty

Napájení:

Interní: 14,4 V z NiMH akumulátorů

Externí: Napájení ze sítě (přes transformátor) 12 ÷ 30 V

Provozní prostředí:

Provozní teplota: -10 až 50 °C

Skladovací teplota: -20 až 50 °C

2.2.2 Hydrotechnik Multi-System 5050

Měřicí vstupy:

Má šest šesti-pinových vstupních zásuvek, z toho jsou čtyři pro analogový signál a dvě pro frekvenční.

Vstupní veličiny mohou být: 0 ÷ 10V; 0/4 ÷ 20 mA

Rychlost měření:

Pro analogový vstup: Nejrychleji cca 1 ms

Chyba měření:

Pro analogový signál: ± 0,1 % z koncové hodnoty

Napájení:

Interní: 14,4 V z NiCd akumulátoru

Externí: Primární – 230 V ze sítě, Sekundární – 24 V z externího zdroje napětí

Provozní prostředí:

Provozní teplota: 0 až 50 °C

Relativní vlhkost: < 80 %

2.2.3 Hydac HMG 3000

Měřicí vstupy:

Má čtyři vstupní konektory pro připojení až osmi analogových snímačů, nebo čtyři inteligentní snímače. Dále má jednu vstupní zdířku pro dva digitální vstupy (pěti-pinové).

Rychlost měření:

Pro analogový vstup:	0,1 ms – pro maximálně 2 vstupní kanály
	0,2 ms – pro maximálně 4 vstupní kanály
	0,5 ms – pro všech 10 vstupních kanálů
	1,0 ms – pro inteligentní senzory

Chyba měření:

Pro proudový vstup ± 0,1 % z koncové hodnoty

Pro napěťový vstup ±0,1 až ±1 % z koncové hodnoty

Napájení:

Interní: Z akumulátoru

Externí: 230 V ze sítě

Provozní prostředí:

Provozní teplota: 0 ÷ 50 °C

Skladovací teplota: 20 ÷ 60 °C

Relativní vlhkost: 0 ÷ 70 %

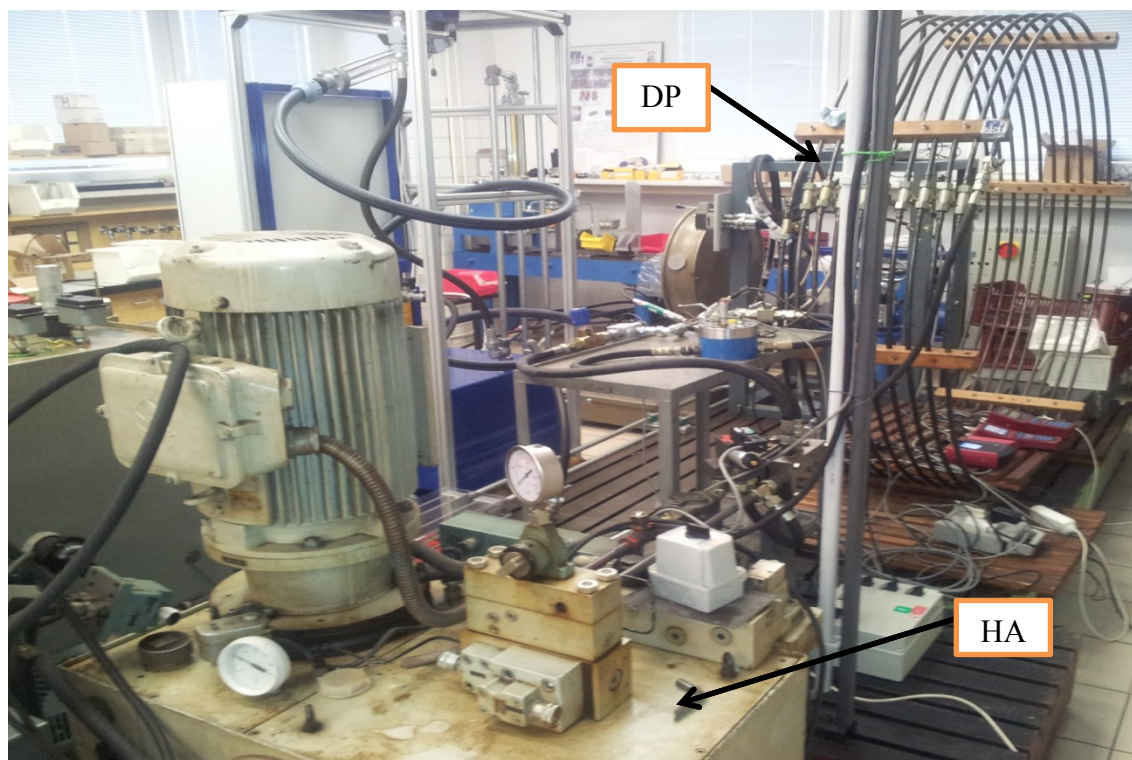


Obr. 2.2 Měřicí zařízení (zleva: Hydrotechnik MS 5050; MS 5060+; Hydac HMG 3000)

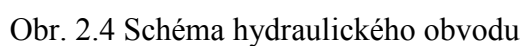
2.3 Schéma a prvky hydraulického obvodu

V rámci praktické části byl sestaven hydraulický obvod, na kterém probíhalo měření, viz schéma obr. 2.4, sestavený obvod, viz obr. 2.3. Tento obvod se skládal z hydraulického agregátu HA, proporcionálního rozváděče PR, sedlového ventilu SV, škrticího ventilu ŠV a dlouhého potrubí DP. Na konci dlouhého potrubí DP byl měřicí bod MB, pro odběr tlaku v jednom bodě, vytvořený pomocí minimess přípojek.

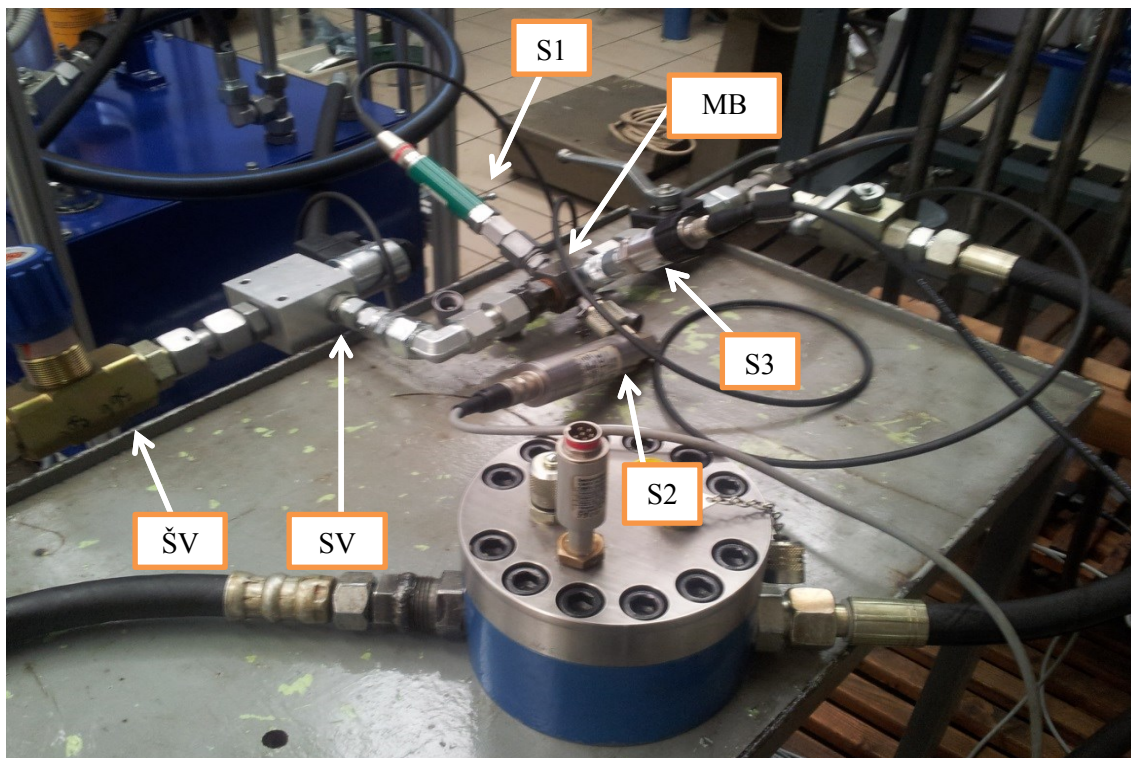
K tomuto místu byly připojeny tři tlakové snímače, snímač Hydrotechnik PR 410 HS (s měřicím zařízením Hydrotechnik MS 5060+), snímač Hydrotechnik PR 15 (s měřicím zařízením Hydrotechnik MS 5050) a snímač Hydac HDA 4000 (s měřicím zařízením Hydac HMG 3000), viz obr. 2.5.



Obr. 2.3 Pohled na kompletní měřicí obvod



- 26

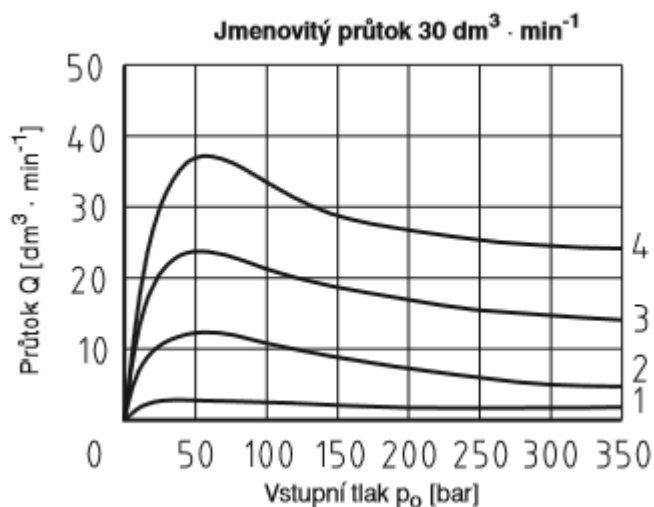


Obr. 2.5 Pohled na jednotlivé prvky a zapojení snímačů tlaku v jednom bodu

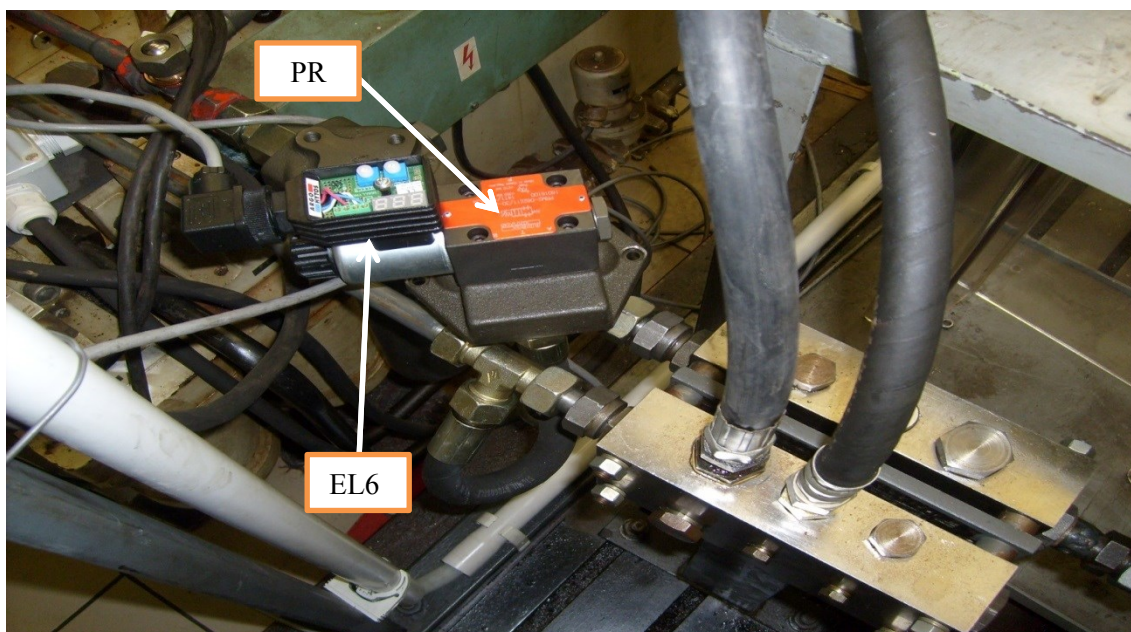
2.4 Popis vybraných prvků obvodu

- PR Proporcionální rozváděč (obr. 2.7) Argo-Hytos PRM2-062Z11/30-24
 Typový klíč:
 PRM2 – Elektromagnetický proporcionální rozváděč řízený elektronikou EL6
 06 – Jmenovitá světlost [mm]
 2Z11 – Vnitřní uspořádání a ovládání rozváděče
 30 – Jmenovitý průtok při $\Delta p = 1$ [MPa]
 24 – Jmenovité napájecí napětí [V]

Graf závislosti proporcionálního rozváděče jmenovitého průtoku na tlaku (obr. 2.6).

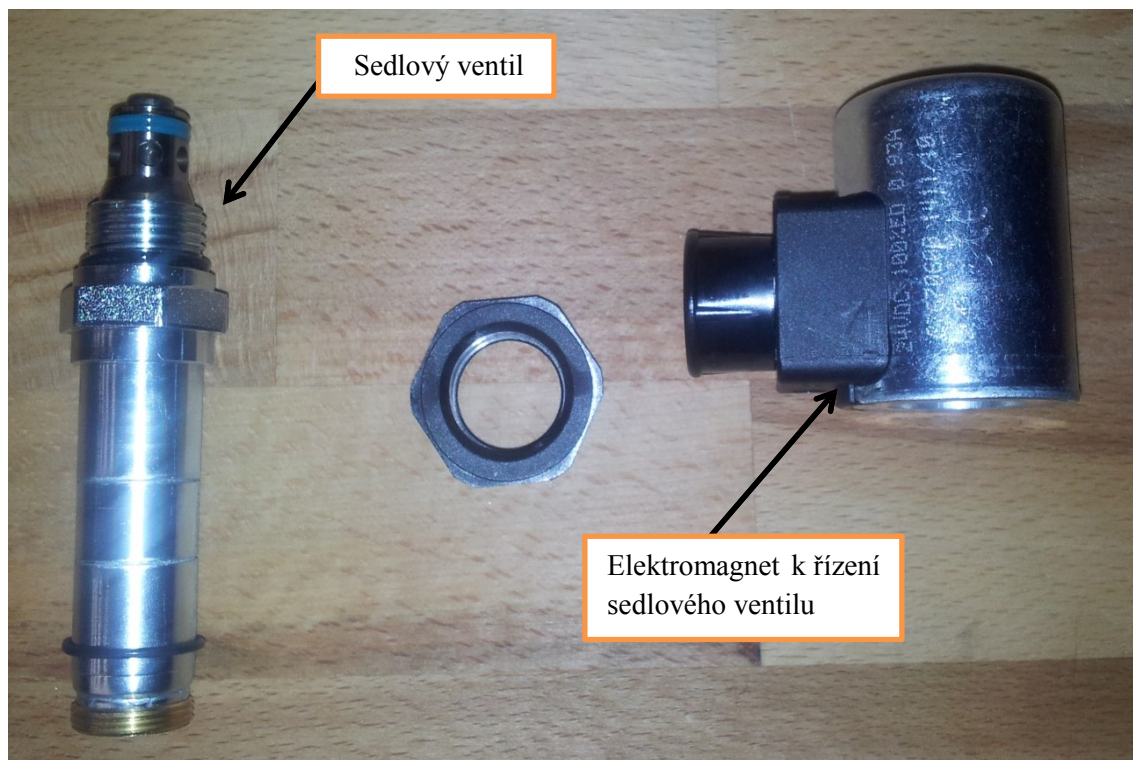


Obr. 2.6 Graf závislosti jmenovitého průtoku na tlaku [15]



2.7 Proporcionální rozváděč

- S0 Senzor teploty Hydrotechnik PT 100
 Rozsah: $-50 \div 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 Přesnost: $\pm 1 \text{ } \%$
 Výstupní signál: $4 \div 20 \text{ mA}$
- SV Vestavný sedlový rozváděč, elektromagneticky ovládaný (obr. 2.8) [15].
 Katalogové označení: Argo-Hytos SD1E-A2/H2S5M9
 Elektromagnet k ovládání ventilu: Argo-Hytos C19B-02400E1-25,75NA



Obr. 2.8 Kompletní prvek SV

3 Popis měření

Bylo provedeno experimentální měření na navrženém hydraulickém obvodu, viz obr. 2.4, kde byly použity tlakové senzory Hydac HDA 4000, Hydrotechnik PR 15 a PR 410 HS, viz obr. 2.1. Měření tlaku probíhalo v jednom uzlu. Byly změřeny tlakové pulzace při dvou frekvencích, pro dvě rozdílné teploty oleje t_o a jedno měření hydraulického rázu, které bylo vyvoláno skokovým uzavřením sedlového ventilu SV.

Příklady měření :

- Při frekvenci tlakových pulzací $f = 5$ Hz
- Při frekvenci tlakových pulzací $f = 8$ Hz
- Hydraulický ráz

Časový krok snímání tlaku byl nastaven pro rychlý snímač PR 410 po 0,1 ms, pro snímač HDA 4000 po 0,5 ms a pro snímač PR 15 po 1 ms.

Pro spuštění měření ve stejném okamžiku byly všechny měřicí zařízení napojené na signál "trigger".

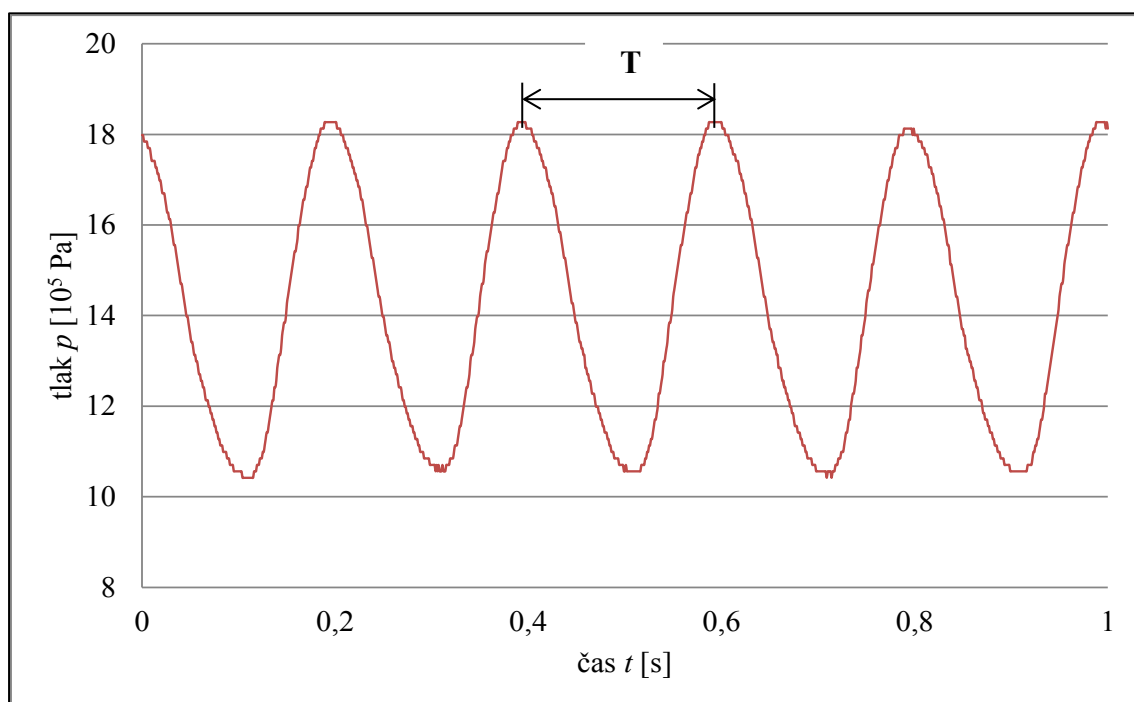
3.1 Měření tlakových pulzací

První příklad výsledků je uveden pro měření tlakové pulzace s frekvencí $f = 5$ Hz, snímačem Hydrotechnik PR 15, při teplotě oleje $t_o = 25$ °C, viz obr. 3.1.

Druhý příklad je uveden pro měření tlakové pulzace s frekvencí $f = 8$ Hz, snímačem Hydrotechnik PR 15, při teplotě oleje $t_o = 25$ °C, viz obr. 3.2.

Při měření tlakových pulzací jsme měření provedli rovněž pro teplotu oleje $t_o = 45$ °C, porovnání měření tlakových pulzací pro obě teploty je patrné z obr. 3.4, 3.5.

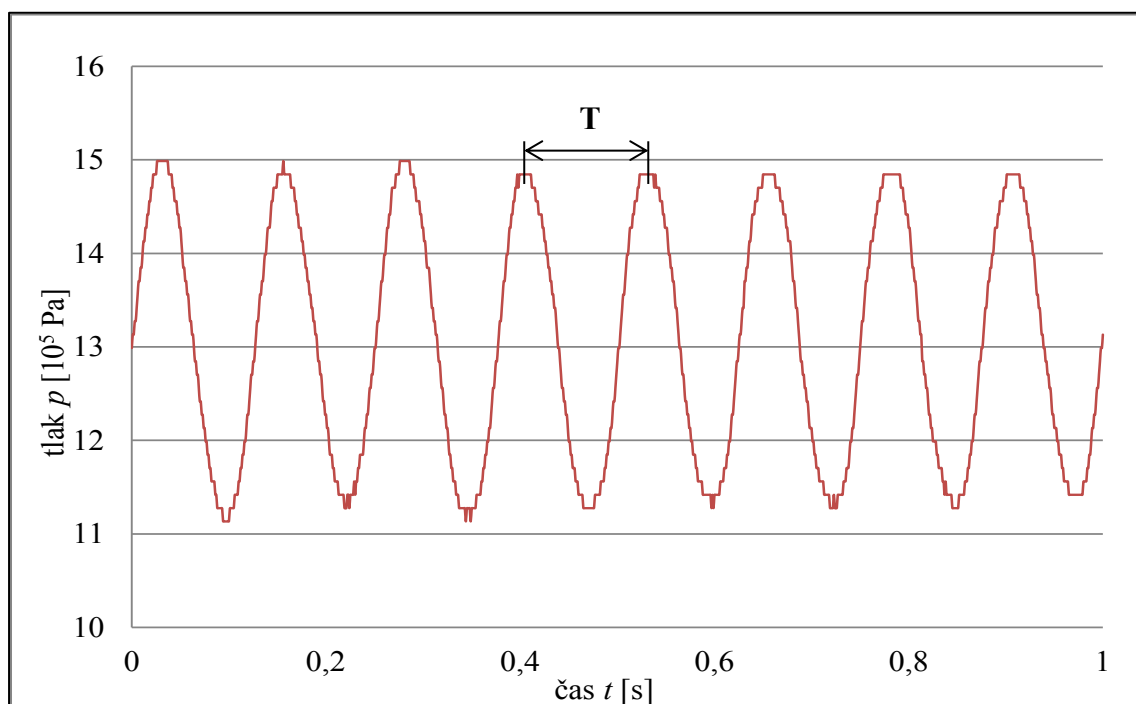
Tlakové pulzace byly generovány pomocí proporcionálního rozváděče, který byl řízený softwarovým programem Matlab Simulink. Řídicím signálem byla sinusová křivka s offsetem 2 V a amplitudou 1,5 V.



Obr. 3.1 Příklad měření pro frekvenci tlakových pulzací $f = 5$ Hz a teplotu oleje $t_o = 25$ °C

Kontrola nastavené frekvence tlakových pulzací $f = 5$ Hz výpočtem. Hodnota T je zakótována na obr. 3.1.:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,595 - 1,395} = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ Hz} \quad (3.1)$$



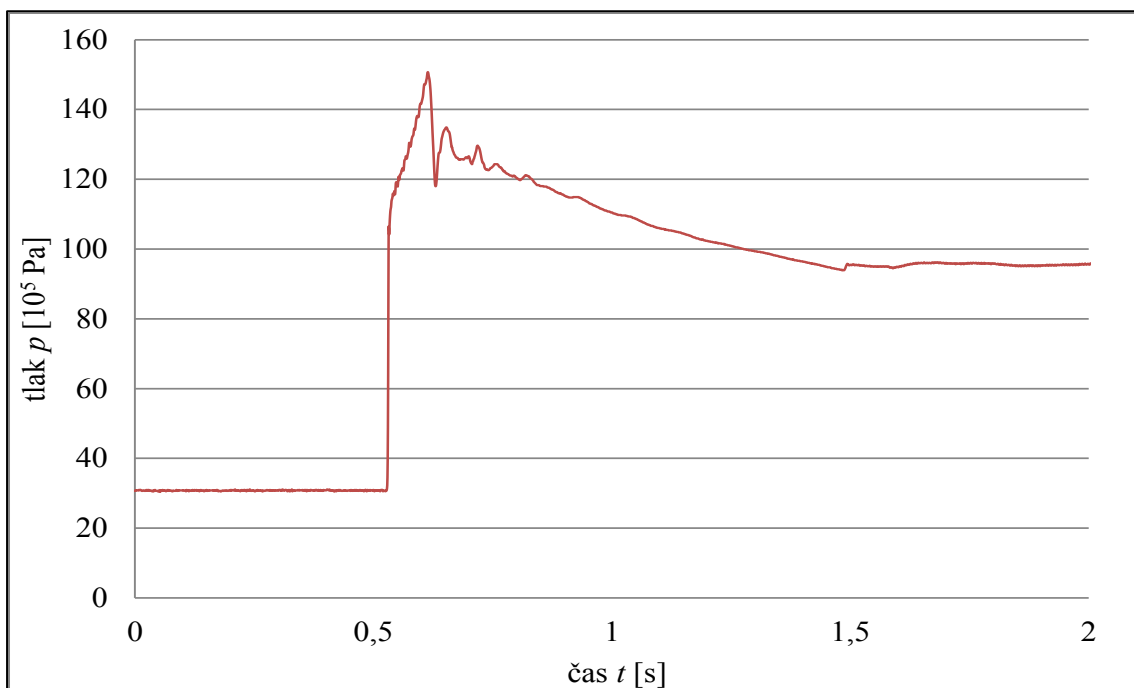
Obr. 3.2 Příklad měření pro frekvenci tlakových pulzací $f = 8$ Hz a teplotu oleje $t_o = 25$ °C

Kontrola nastavené frekvence tlakových pulzací $f = 8$ Hz výpočtem, hodnota T je zakótována na obr. 3.2.:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,28 - 1,156} = \frac{1}{0,124} = 8,065 \text{ Hz} \quad (3.2)$$

3.2 Měření hydraulického rázu

Příklad měření hydraulického rázu tlakovým snímačem Hydrotechnik PR 15, viz obr. 3.3, který byl vyvolán skokovým uzavřením sedlového ventilu SV. Příklad měření hydraulického rázu je uveden pro teplotu oleje $t_o = 45$ °C.

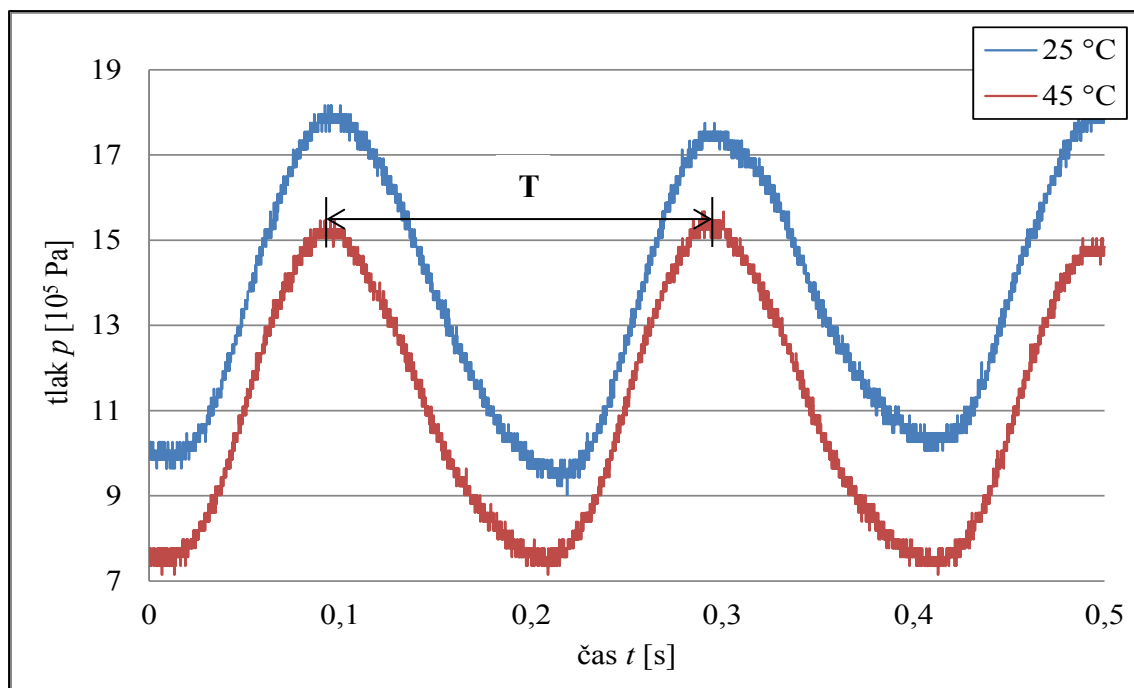


Obr. 3.3 Příklad měření hydraulického rázu při teplotě oleje $t_o = 45\text{ °C}$

3.3 Porovnání výsledků měření tl. pulzací při rozdílné teplotě oleje t_o

Měření bylo provedeno pro dvě teploty, studený olej $t_o = 25\text{ °C}$ a zahřátý olej $t_o = 45\text{ °C}$. Porovnávám vždy hodnoty jednoho senzoru, zbylé senzory vykazují minimální odchylky, proto tyto hodnoty považuji za totožné. Rozdíly jsem porovnal u měření s frekvencí tlakových pulzací $f = 5\text{ Hz}$ snímačem PR 410 HS, viz obr. 3.4. Dále u měření s frekvencí tlakových pulzací $f = 8\text{ Hz}$ snímačem HDA 4000, viz obr. 3.5.

Olej s vyšší teplotou má menší míru vnitřního tření v kapalině a dochází ke snížení třecích odporů v systému.

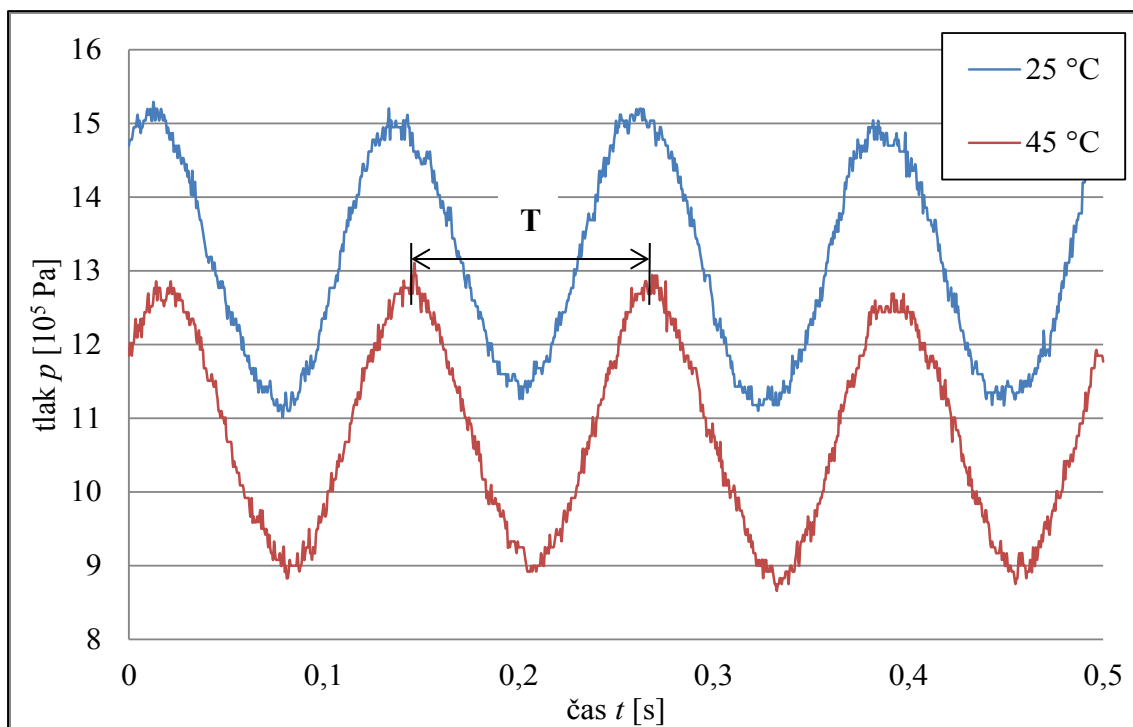


Obr. 3.4 Porovnání frekvence tlakových pulzací $f = 5\text{ Hz}$, pro dvě teploty oleje t_o

Kontrola frekvence tlakových pulzací zahřáté kapaliny, doba periody určena jako vzdálenost tlakových špiček, viz zakótování v obr. 3.4:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,7895 - 0,5896} = \frac{1}{0,1999} = 5,003 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Z kontrolního výpočtu (3.3) je vidět, že frekvence pulzací se vlivem vyšší teploty nezměnila.



Obr. 3.5 Porovnání frekvence tlakových pulzací $f = 8 \text{ Hz}$, pro dvě teploty oleje t_o

Kontrola frekvence tlakových pulzací zahřáté kapaliny, doba periody určena jako vzdálenost tlakových špiček T , zakótována v obr. 3.5.:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,27 - 1,147} = \frac{1}{0,123} = 8,13 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

Výsledek se mírně liší vzhledem k nastavené frekvenci tlakových pulzací $f = 8 \text{ Hz}$, ovšem při srovnání s výpočtem (3.2), je vidět pouze minimální rozdíl.

4 Vyhodnocení měření

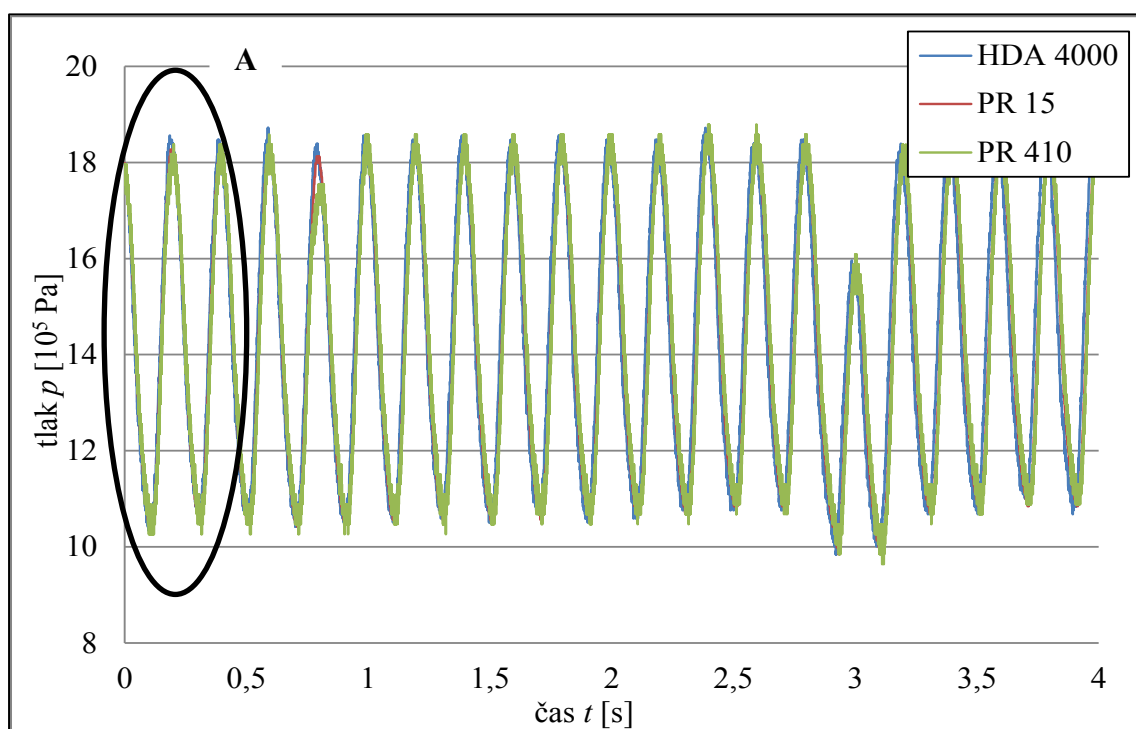
V této kapitole budou porovnány záznamy měření tlaku všech tří použitých tlakových senzorů. Porovnání bude provedeno pro měření tlakových pulzací s frekvencí $f = 5$ a 8 Hz a také pro hydraulický ráz.

4.1 Měření tlakových pulzací při teplotě oleje $t_o = 25$ °C

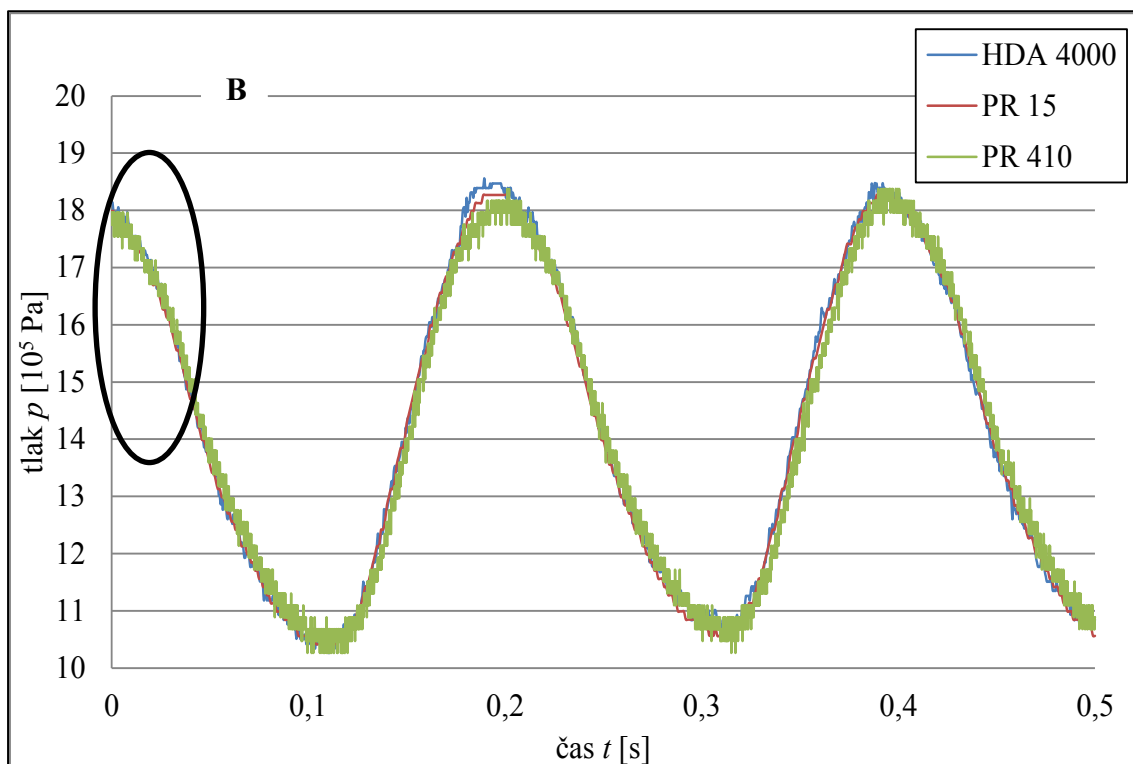
Toto měření probíhalo s olejem o teplotě oleje $t_o = 25$ °C, což byla teplota vzduchu v laboratoři.

4.1.1 Měření pro frekvenci tlakových pulzací $f = 5$ Hz

Na obr. 4.1 je vidět záznam tlakových pulzací v odběrném místě hydraulického obvodu při frekvenci $f = 5$ Hz a teplotě oleje $t_o = 25$ °C. Je patrné, že všechny tři tlakové senzory vykazují obdobné hodnoty tlaku p . Na obrázku 4.2 je zobrazen detail A z průběhu tlakových pulzací, viz obr. 4.1, kde už můžeme vidět drobné rozdíly. Obrázek 4.3 zobrazuje detail B z průběhu tlakových pulzací, viz 4.2 a lze vidět, že záznam tlaku pomocí jednotlivých snímačů se mírně liší. Dále můžeme pozorovat nastavenou frekvenci snímání pro jednotlivé tlakové senzory, která byla pro nejrychlejší senzor Hydratechnik PR 410 HS, $f = 10000$ Hz, pro Hydac HDA 4000, $f = 2000$ Hz a pro Hydratechnik PR 15, $f = 1000$ Hz.

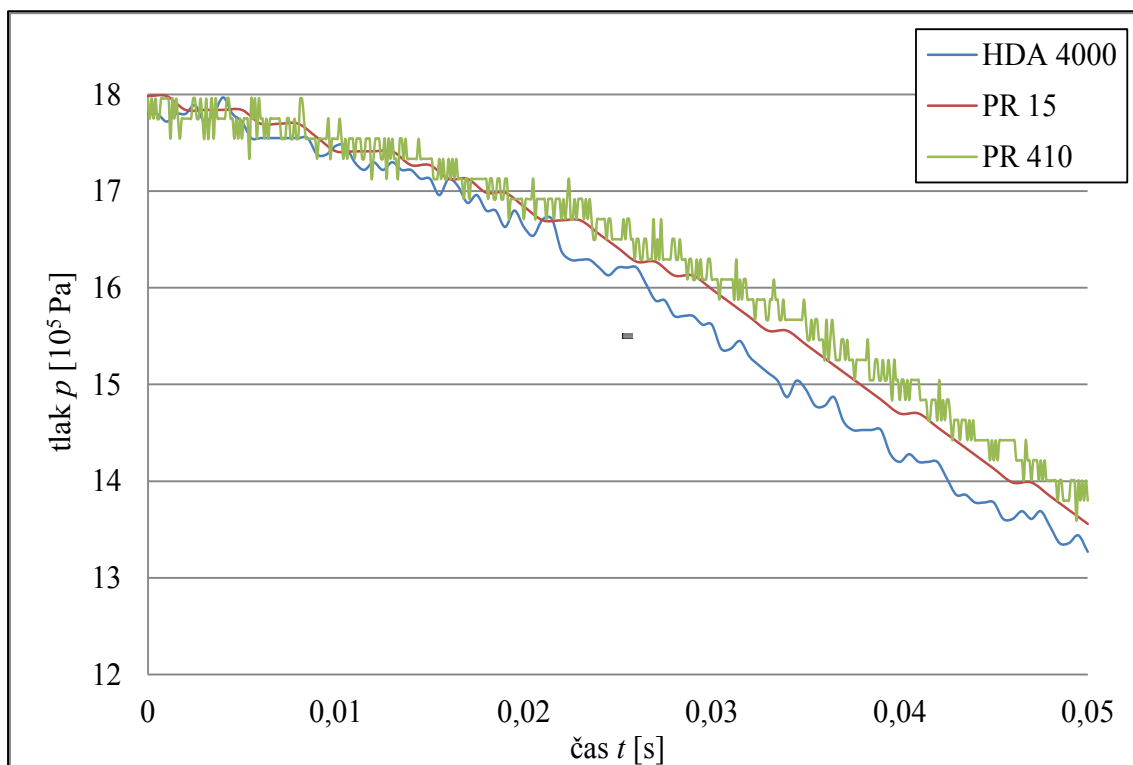


Obr. 4.1 Záznam měření tlaku p v čase $t = (0 \div 4)$ s



Obr. 4.2 Záznam měření tlaku p v čase $t = (0 \div 0,5)$ s, detail A (obr. 4.1)

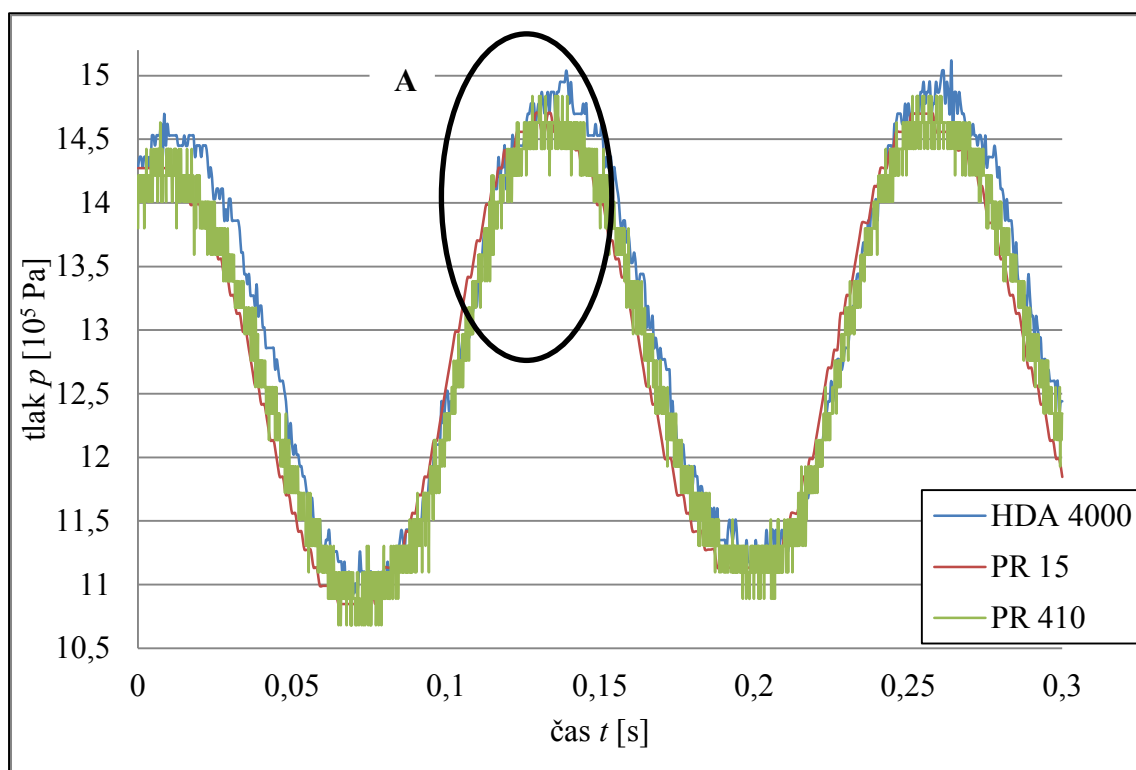
Na detailu tlakové pulzace snímané pomocí třech tlakových senzorů s rozdílným časovým krokem je vidět rozdílná frekvence snímání tlaků, kde rychlý snímač PR 410 (zelená) zaznamenává tlaky s časovým krokem 0,1 ms a má tedy největší hustotu záznamu tlaku p v čase t . Dále je z obr. 4.3 vidět snímač HDA 4000 (modrá), který zaznamenává tlak s časovým krokem 0,5 ms a snímač PR 15 (červená), zaznamenávající hodnoty tlaku s časovým krokem 1 ms a má tedy nejnižší hustotu záznamu tlaku p v čase t .



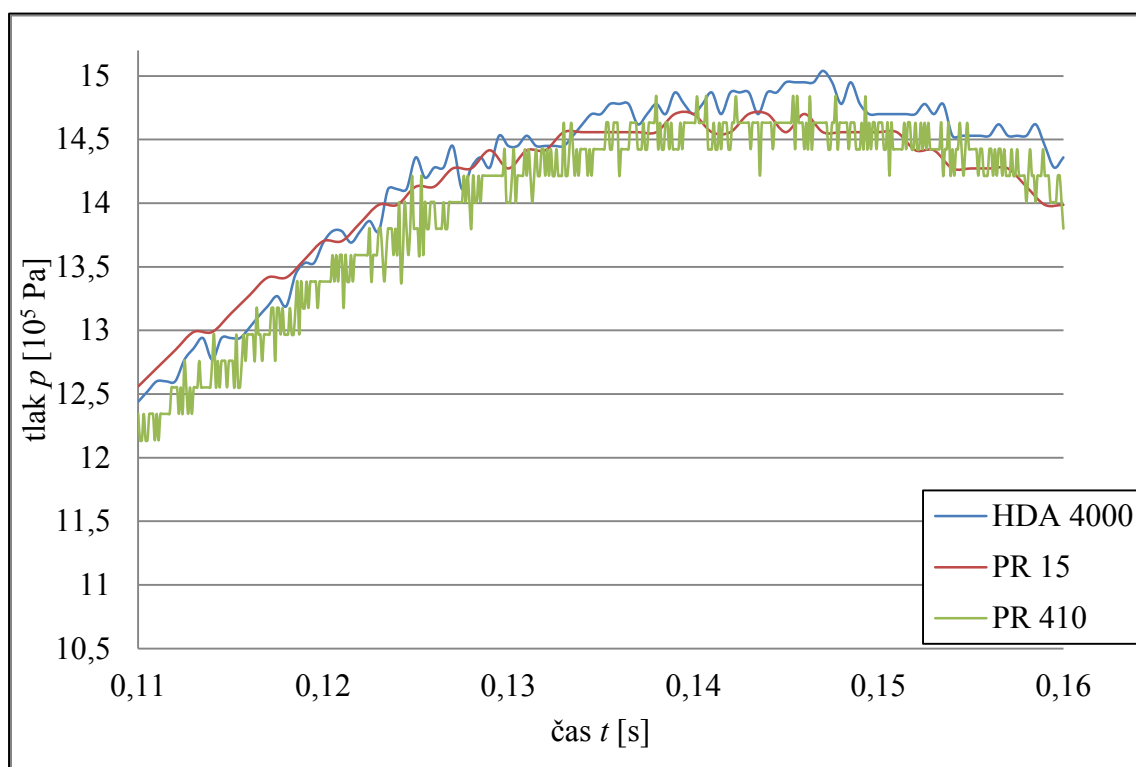
Obr. 4.3 Záznam měření tlaku p v čase $t = (0 \div 0,05)$ s, detail B (obr. 4.2)

4.1.2 Měření pro frekvenci tlakových pulzací $f = 8 \text{ Hz}$

Z obrázku 4.4 můžeme vidět výběr dat z doby měření $t = 0 - 0,3 \text{ s}$, oproti frekvenci pulzací $f = 5 \text{ Hz}$ můžeme pozorovat i zmenšení amplitudy. Na detailu obr. 4.5 je vidět rozdílná frekvence snímání senzorů.



Obr. 4.4 Záznam měření tlaku p v čase $t = (0 \div 0,3) \text{ s}$



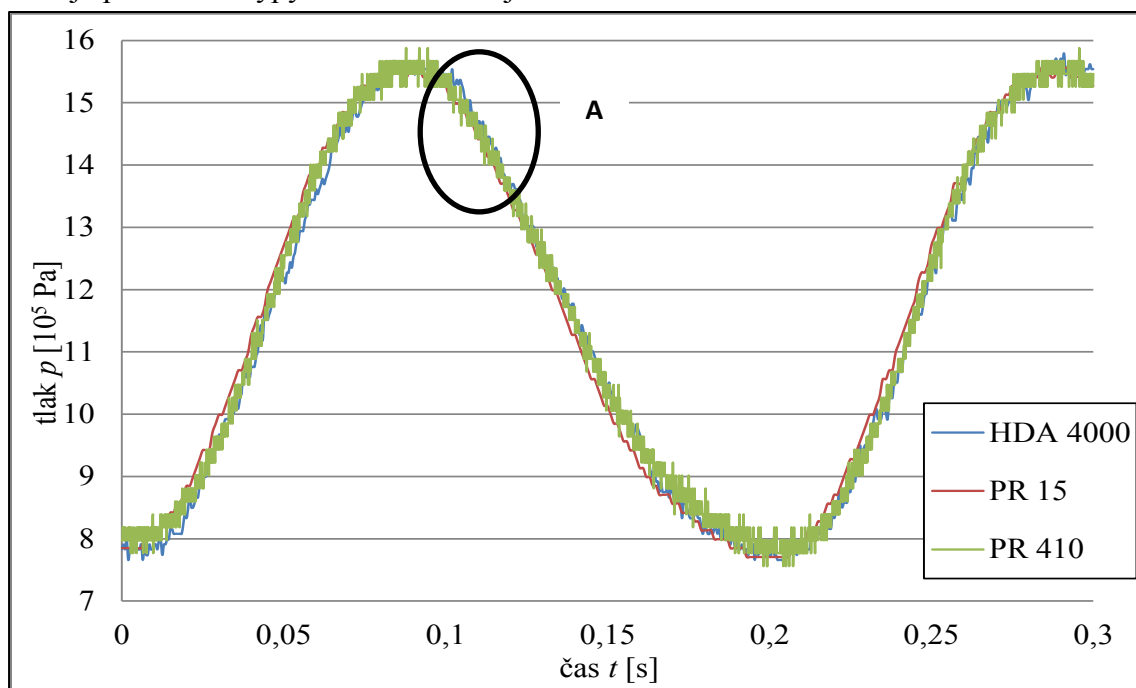
Obr. 4.5 Záznam měření tlaku p v čase $t = (0,11 \div 0,16) \text{ s}$, detail A (obr. 4.4)

4.2 Měření tlakových pulzací při teplotě oleje $t_o = 45\text{ °C}$

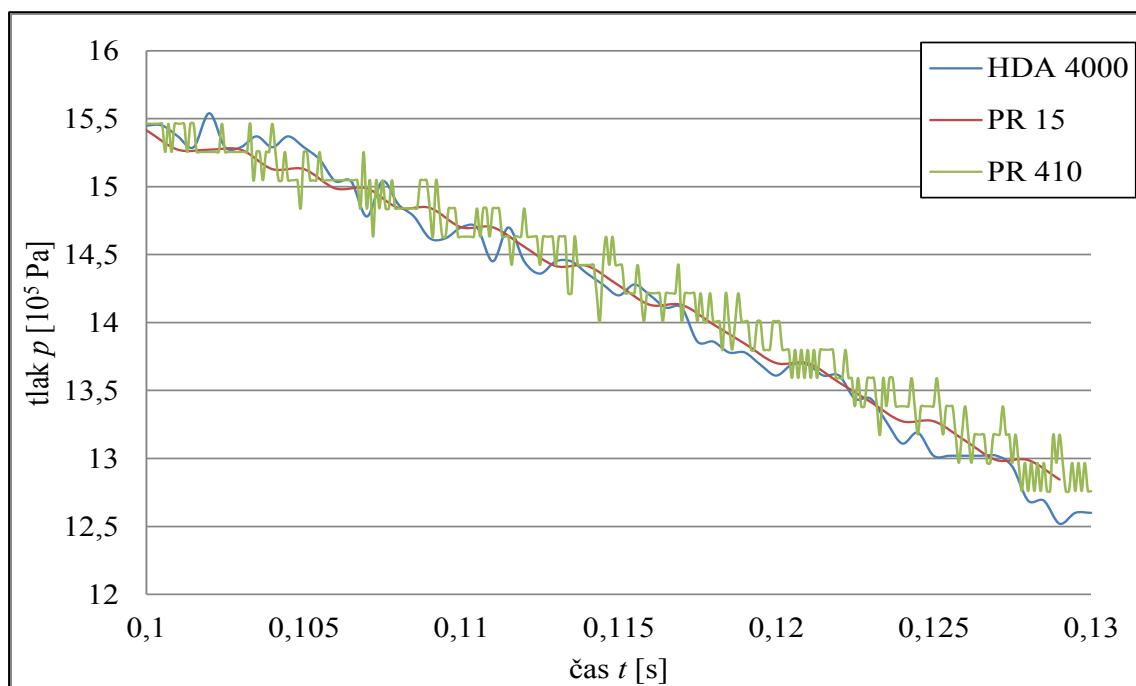
4.2.1 Měření pro frekvenci tlakových pulzací $f = 5\text{ Hz}$

Na obr. 4.6 je vidět záznam tlakových pulzací v odběrném místě při frekvenci $f = 5\text{ Hz}$ a teplotě oleje $t_o = 45\text{ °C}$. Zahřátý olej má nižší viskozitu a menší odpor, což způsobí snížení hodnoty tlaku v měřicím bodě MB, oproti oleji o teplotě $t_o = 25\text{ °C}$.

Obrázek 4.7 zobrazuje detail záznamu průběhu pulzace tlaku p v čase t , viz obr. 4.6. Z měření pulzací při různých frekvencích můžeme usoudit to, že snímač Hydrotechnik PR 15 je pro takové typy měření dostačující.



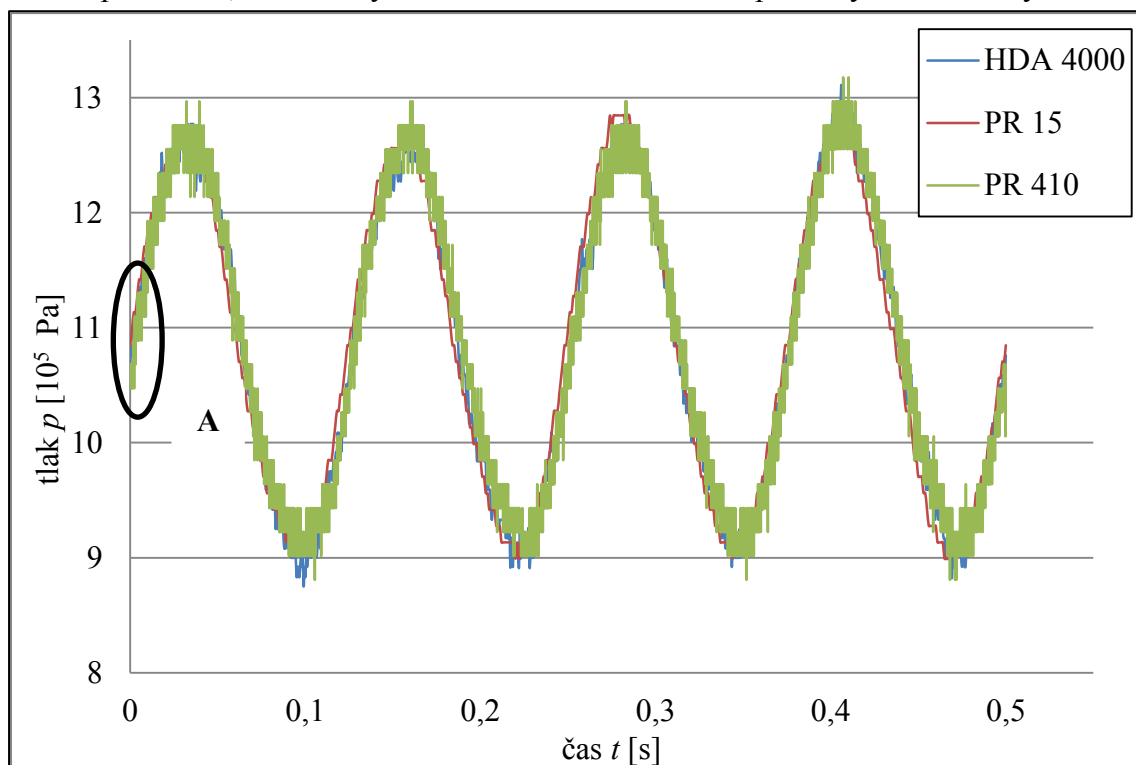
Obr. 4.6 Záznam měření tlaku p v čase $t = (0 \div 0,3)\text{ s}$, měření s frekvencí pulzací $f = 5\text{ Hz}$ a teplotě zahřátého oleje $t_o = 45\text{ °C}$



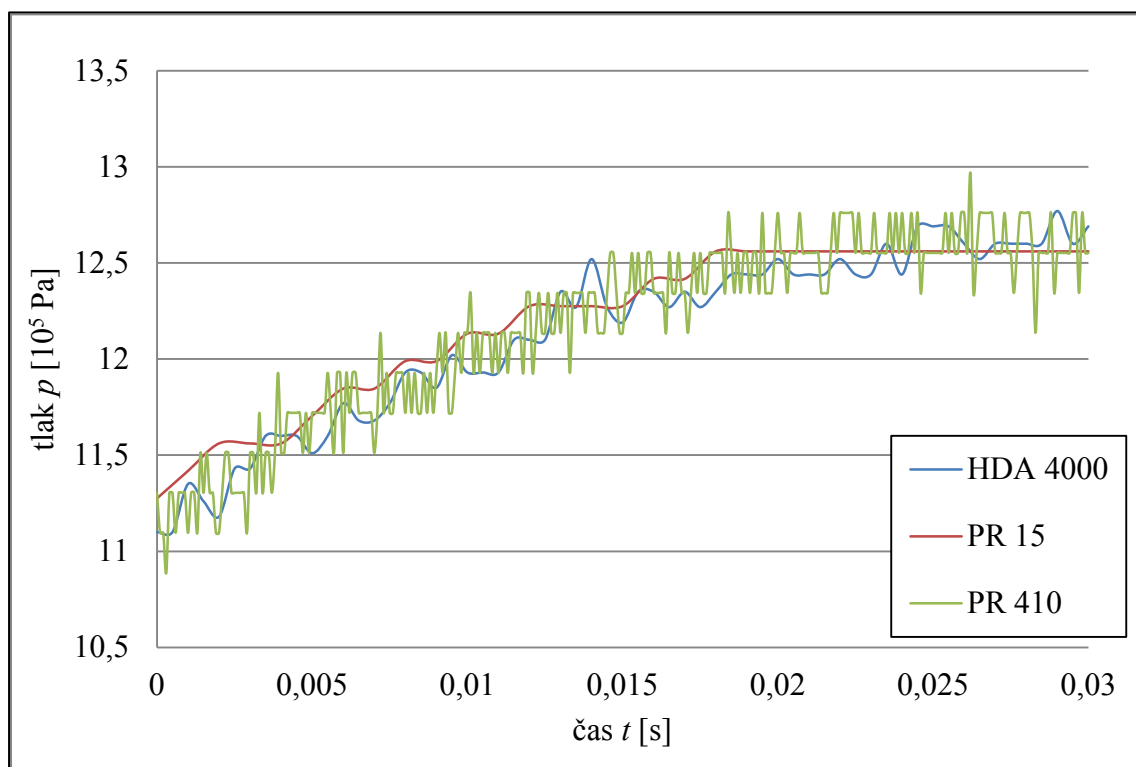
Obr. 4.7 Záznam měření tlaku p v čase $t = (0,1 \div 0,13)\text{ s}$, detail A (obr. 4.6)

4.2.2 Měření pro frekvenci tlakových pulzů $f = 8 \text{ Hz}$

Na obr. 4.8 je vidět část měření tlakových pulzů při frekvenci $f = 8 \text{ Hz}$ a teplotě oleje $t_o = 45 \text{ °C}$, amplituda sinusové křivky se opět výrazně zmenšila. V detailu na obr. 4.9 můžeme pozorovat, že všechny snímače měří hodnotu tlaku p s nevýraznou odchylkou.



Obr. 4.8 Záznam měření tlaku p v čase $t = (0 \div 0,5) \text{ s}$, měření při frekvenci pulzací $f = 8 \text{ Hz}$ a teplotě zahřátého oleje $t_o = 45 \text{ °C}$



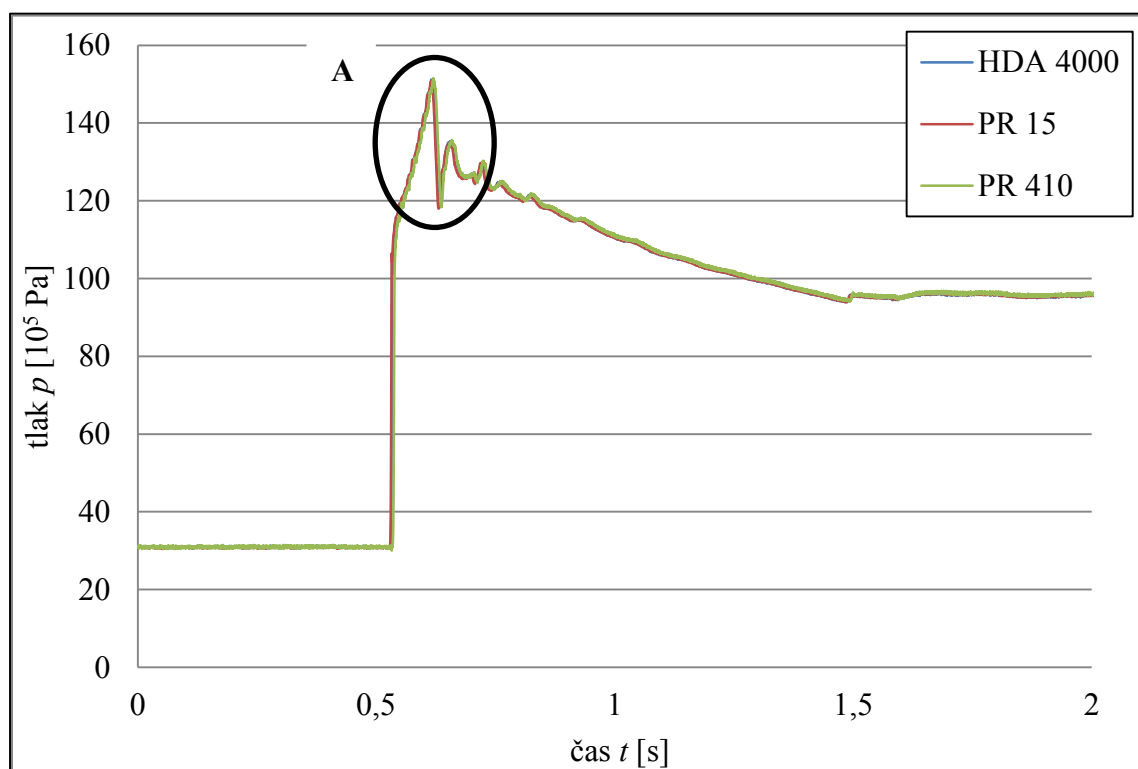
Obr. 4.9 Záznam měření tlaku p v čase $t = (0 \div 0,3) \text{ s}$, detail A (obr. 4.8)

4.3 Měření hydraulického rázu

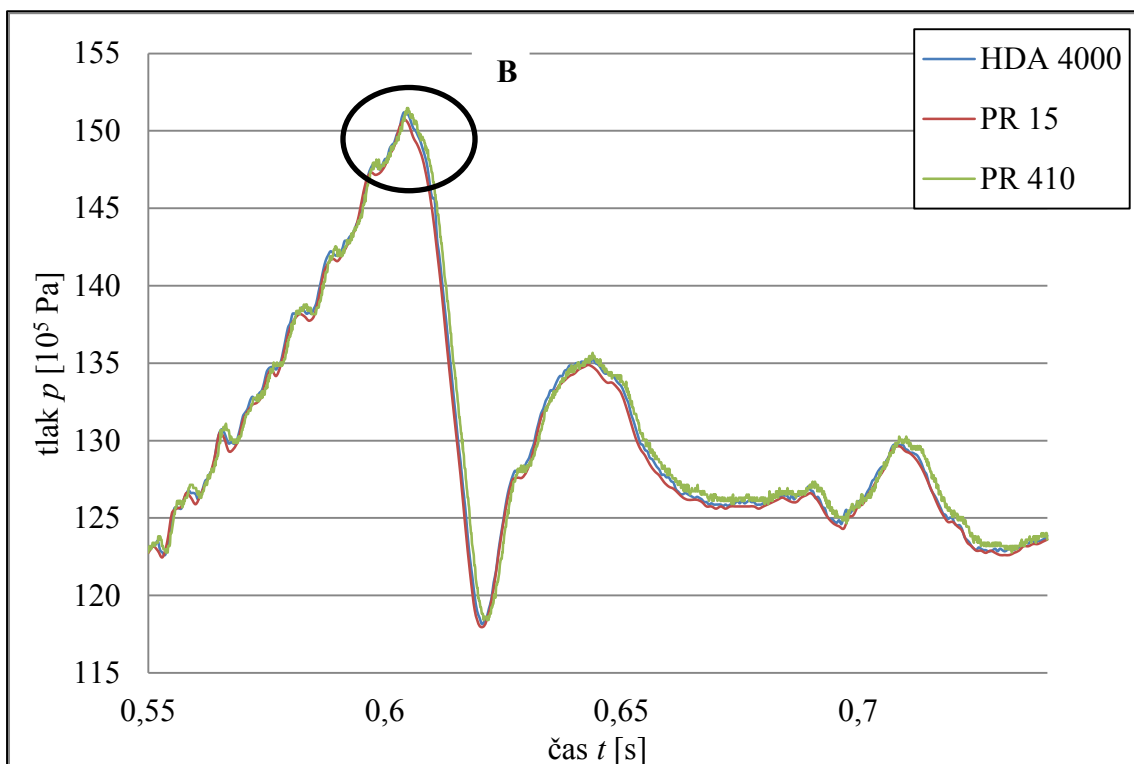
Na obr. 4.10 je zobrazen náhlý nárůst tlaku při hydraulickém rázu, který vznikl skokovým uzavřením sedlového ventilu SV. Tlaková špička dosáhla při teplotě oleje $t_o = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, přibližné hodnoty tlaku $p = 15\text{ MPa}$.

Na detailu hydr. rázu je zobrazeno naměřené zakmitání, z kterého můžeme vidět, že rychlý tlakový senzor Hydrotechnik PR 410 (zelená), zaznamenával tlaky s časovým krokem 0,1 ms, má největší hustotu záznamu. Proto tento senzor vystihl nejvyšší hodnotu tlaku s nejrychlejšími změnami, viz obr. 4.12. Dále můžeme vidět, že snímač Hydac HDA 4000, zaznamenával tlak s časovým krokem 0,5 ms a snímač PR 15 s časovým krokem 1 ms a má tedy nejnížší hustotu záznamu s menší přesností.

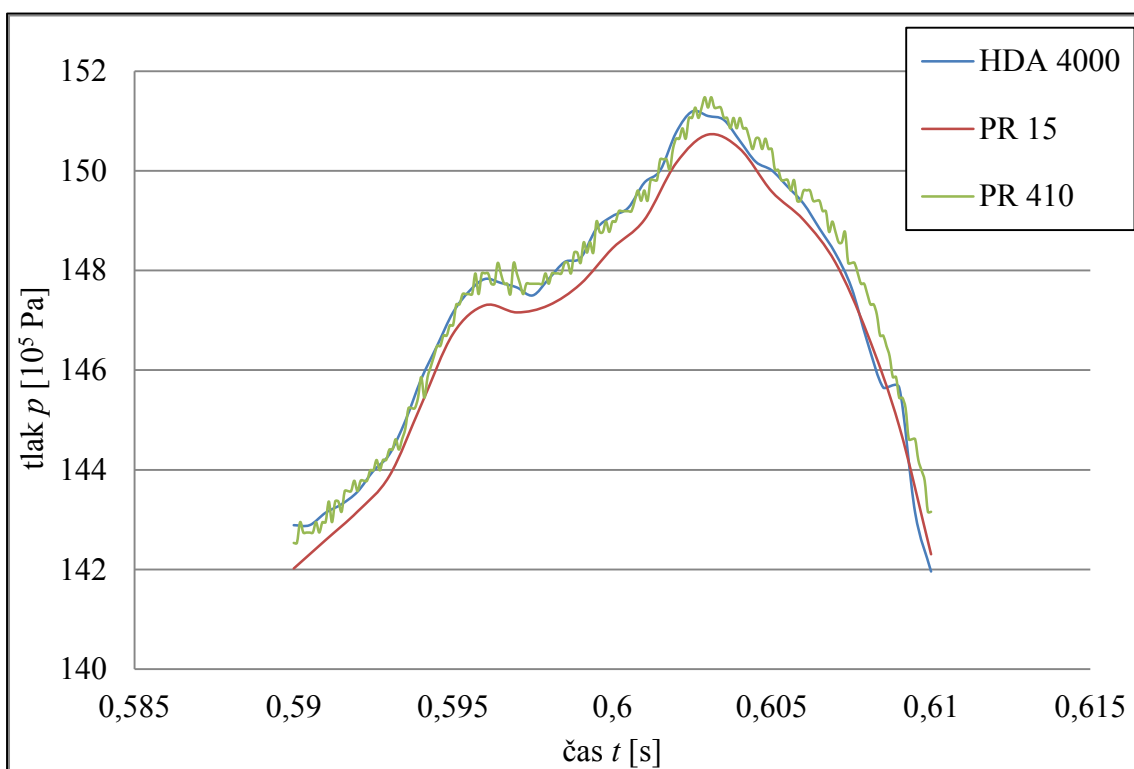
Pomocí snímače PR 410 HS je na rozdíl od snímače HDA 4000 a PR 15 zaznamenána také frekvence pulzací v průběhu tlakové špičky, což je patrné z obrázku 4.12 v oblasti, kdy dochází k poklesu tlaku p . V této oblasti snímač HDA 4000 zaznamenal pouze náznak tlakových pulzací a snímač PR 15 vykazuje hladký průběh tlaku p .



Obr. 4.10 Hydraulický ráz simulovaný v čase měření $t = (0 \div 2)\text{ s}$



Obr. 4.11 Zakmitání při maximálním tlaku p , detail A (obr. 4.10)



Obr. 4.12 Největší tlaková špička, detail B (obr. 4.11)

5 Závěr

V práci jsem řešil porovnání vlivu frekvence snímání třech tlakových senzorů na záznam tlakové odezvy. Zpracoval jsem literární rešerši fyzikální veličiny, kterou je tlak a jeho měření. Principy těchto měření jsou uvedeny v této části práce v kapitole 1. Důležitou součástí této kapitoly je zaměření na problematiku měření elektrických tlakoměrů, konkrétně fungujících na tzv. piezorezistivním jevu. Na stejném principu pracují snímače, které jsem porovnával v této bakalářské práci.

Další část práce jsem věnoval specifikaci srovnávaných snímačů a měřících zařízení, popisu hydraulického obvodu, na kterém probíhalo experimentální měření a prvkům obsažených v tomto hydraulickém obvodu.

Samotné měření tlaků, které probíhalo ve stejném bodě MB na konci dlouhého potrubí DP, jsem provedl pro dvě frekvence tlakových pulzací. Frekvence tlakových pulzací byly generovány proporcionálním rozváděčem. Měření tlakových pulzací při dvou frekvencích jsem zaznamenal pro dvě rozdílné teploty oleje. Tyto měření s odlišnými teplotami jsem porovnal a zkontroloval jsem, zdali se s nárůstem teploty oleje nezměnila nastavená frekvence snímání. Pro zahřátý olej jsem se dodatečně rozhodl změřit průběh tlakové špičky při hydraulickém rázu. Během experimentálního měření, které jsem na hydraulickém zařízení prováděl, jsem se naučil obsluhovat měřící zařízení firem Hydrotechnik a Hydac.

Rozdíly mezi naměřenými tlaky jsou minimální, což je vidět z naměřených průběhů v této práci. Dále je z nich patrná frekvence snímání jednotlivých snímačů. Drobné odchylky u průběhů tlaku v čase mohou být způsobeny kalibrací snímačů. U zjišťování tlakové špičky během hydraulického rázu, je dobře viditelné, jak rychle a přesně umí měřit rychlý snímač Hydrotechnik PR 410. Zbylé dva snímače nestihly zaznamenat tak rychlou změnu tlaku, ovšem výsledky jejich měření jsou dostačující. V měřených záznamech nebylo dosaženo tak velké dynamické změny tlaku, aby bylo nezbytně nutné snímač s vysokou frekvencí záznamu využít.

6 Seznam použité literatury

- [1] JÁNALÍK, Jaroslav a ŠTÁVA, Pavel. *Mechanika tekutin*. Ostrava: Fakulta strojní katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. 19. 10. 2015
- [2] *Informační portál z oblasti automatizace* [online]. [cit. 2015-11-01]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/>
- [3] JAKUBEC, Jan. *Měření tlaku* [online]. Brno, 2009 [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16195.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [4] *Měření tlaku* [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <https://merenitlaku.wordpress.com>
- [5] *Měření tlaku* [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/mertl.htm>
- [6] *Oborový portál pro vyhrazená tlaková zařízení* [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/>
- [7] JÁNALÍK, Jaroslav. *Měření tekutinových mechanismů* [online]. Ostrava: Skripta VŠB-TU Ostrava, 1995 [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/seznam.htm>
- [8] TŮMA, Jiří. *Diagnostika strojů* [online]. Ostrava: Skripta VŠB-TU Ostrava, 2009 [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~tum52/index.php?page=publications>
- [9] *Pokusy z fyziky* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://pokusy.upol.cz>
- [10] *Stavebnicové systémy* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.spslevice.sk/ucebnice>
- [11] *Časopis Automa* [online]. 2005 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=30389
- [12] *Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb* [online]. 2014 [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3068832/>
- [13] *Hydrotechnik* [online]. [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: <http://www.hydrotechnik.co.uk>
- [14] *Hydac* [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: www.hydacusa.com
- [15] *Argohytos* [online]. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.argo-hytos.com/cz.html>